JOHN GRIBBIN

HISTORIA DE LA CIENCIA

1543 - 2001





En este libro colosal, John Gribbin —a quien el *Sunday Times* califica de «maestro de la divulgación científica»— narra la historia de los hombres que desde el Renacimiento hicieron ciencia y de los turbulentos tiempos que les tocó vivir. Aquí aparecen no sólo las figuras estelares de Copérnico, Vesalio, Galileo, Newton, Mendel, Darwin o Einstein, sino también gentes corrientes, oscuras, excéntricas e incluso enloquecidas que, dedicadas a la ciencia, trataron de satisfacer su curiosidad sobre este mundo. De esta *Historia de la ciencia*, que nos transmite toda la emoción del descubrimiento, Roy Porter ha dicho: «Es una obra extraordinariamente precisa, coronada felizmente. Fundada en unos conocimientos enciclopédicos, nos presenta los problemas y las investigaciones científicas con claridad, pericia y vigor, no exentas de brillantez narrativa. Gribbin sabe cómo llenar de vida a la ciencia y a los científicos».

epublibre

John Gribbin

HISTORIA DE LA CIENCIA, 1543-2001

ePub r1.0
et.al 19.02.2019

Título original: *SCIENCE. A HISTORY, 1543-2001*
John Gribbin, 2001
Traducción: Mercedes García Garmilla
Retoque de cubierta: et.al

Editor digital: et.al
ePub base r2.0







Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a las siguientes instituciones por haberme facilitado el acceso a sus bibliotecas, así como a otros materiales: Académie Française y Jardin des Plantes, de Paris; Bodleian Library, en Oxford; Museo Británico y Museo de Historia Natural, Londres; Cavendish Laboratory, Cambridge; Sociedad Geológica, Londres; Downe House, Kent; Linnaean Society, Londres; Royal Astronomical Society; Royal Geographical Society; Royal Institution; Trinity College, Dublin; Biblioteca de la Universidad de Cambridge. Como siempre, la Universidad de Sussex me proporcionó base y apoyo, incluido el acceso a Internet. Sería injusto destacar a alguna de las muchas personas que se prestaron a comentar conmigo ciertos aspectos del proyecto, pero ellas saben quiénes son y cuentan todas con mi agradecimiento.

En este texto utilizo el pronombre personal de primera persona tanto en singular como en plural. El «yo», por supuesto, aparece allí donde presento mi propia opinión sobre algún tema científico, mientras que «nosotros» se utiliza para incluir a la coautora, Mary Gribbin, siempre que sea necesario. Su ayuda para garantizar que las palabras que siguen sean comprensibles a quienes no son científicos ha resultado imprescindible, aquí como en todos mis libros.



1. Un encuentro mítico entre grandes mentes: Aristóteles, Hevelius y Kepler.

1. Un encuentro mítico entre grandes mentes. Aristóteles, Hevelius y Kepler discuten sobre la órbita de los cometas. (Extraído de la *Cometographia* de Hevelius, 1668).

INTRODUCCIÓN

Lo más importante que la ciencia nos enseña sobre el lugar que ocupamos en el universo es que no somos especiales. El proceso comenzó en el siglo XVI con la obra de Nicolás Copérnico, quien planteó que la Tierra no estaba en el centro del universo, y se aceleró después de que Galileo, a principios del siglo XVII, utilizara un telescopio para obtener la prueba definitiva de que la Tierra es en realidad un planeta que describe una órbita alrededor del Sol. Con las oleadas sucesivas de descubrimientos astronómicos que se produjeron durante los siglos siguientes, los astrónomos se dieron cuenta de que, del mismo modo que la Tierra es un planeta ordinario, también el Sol es una estrella ordinaria (una de los varios cientos de miles de millones de estrellas que forman nuestra galaxia, la Vía Láctea) y la propia Vía Láctea es tan sólo una galaxia ordinaria (una de los varios cientos de miles de millones que hay en el universo visible). Llegaron incluso a plantear, a finales del siglo XX, que este universo puede no ser el único.

Mientras sucedía todo esto, los biólogos intentaban sin éxito hallar alguna prueba de la existencia de una «fuerza vital» especial que diferenciara a la materia viva de la materia inerte, llegando a la conclusión de que la vida no es más que un conjunto de procesos químicos bastante complicados. El historiador se encuentra con una curiosa coincidencia: uno de los grandes hitos del comienzo de la investigación biológica sobre el cuerpo humano fue la publicación de De Humani Corporis Fabrica (Sobre la estructura del cuerpo humano) *de Andrés Vesalio (Andreas Vesalius) en 1543, el mismo año en que Copérnico publicó finalmente* De Revolutionibus Orbium Coelestium (Sobre las revoluciones de los cuerpos celestes)*. Es-*

ta coincidencia hizo que 1543 fiera el punto de partida para la revolución científica que habría de transformar primero Europa y luego el mundo.

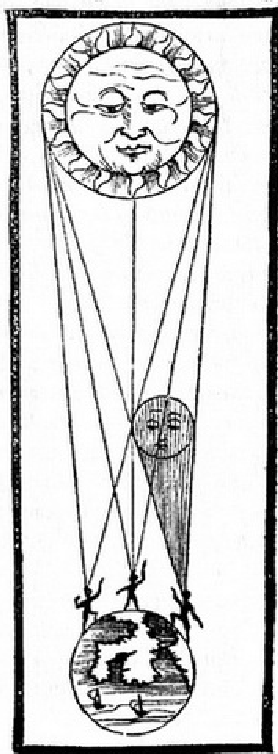
Por supuesto, cualquier fecha que elijamos para fijar el comienzo de la historia de la ciencia será siempre arbitraria, y, mi relato, además, está también limitado en el espacio geográfico, lo mismo que en el espacio de tiempo que cubre. Mi propósito es esbozar el desarrollo de la ciencia occidental desde el Renacimiento hasta aproximadamente el final del siglo XX*. Esto significa dejar a un lado los logros de los antiguos griegos, los chinos y los científicos y filósofos islámicos, que tanto hicieron por mantener activa la búsqueda del conocimiento de nuestro mundo durante el período que los europeos denominamos «la edad oscura» y «la Edad Media». Sin embargo, también significa narrar una historia coherente, fijando claramente en el espacio y el tiempo el comienzo de la evolución de la visión del mundo que constituye el núcleo de nuestra forma de comprender el universo y el lugar que ocupamos en él actualmente. Y es que la vida humana resulta no ser diferente de cualquier otro tipo de vida existente en la Tierra. Tal como quedó ya establecido en el siglo* XIX *en las obras de Charles Darwin y Alfred Wallace, todo lo que se necesita para hacer seres humanos a partir de las amebas es el proceso de la evolución por selección natural y un montón de tiempo.*

Parte.

le faltaua poco para llegar ala cola/ d̃ manera
q̃ touiese latitud septẽtrional/los q̃ estuuiesen
enlos climas septẽtrionales veriã la luna eclip
sar a todo el sol: y los d̃la eq̃nocial veriã eclipsa
da la pte septẽtrional d̃l sol: y los meridionales
veriã el sol sin eclipsi. Assi q̃ aunq̃ el eclipsi del
sol sea total o particular no puede ser vniuer-
sal en todo la tierra. Notase que para la quãti
dad destos eclipsis el diametro assi del sol co-
mo dela luna diuidẽ los astrologos en doze p̃-
tes yguales: y a estas
ptes llamã dedos/o pũ
tos. Y segũ los puntos
del diametro de la luna
que cubre la sombra de
la tierra/o las partes d̃l
diametro del sol que cu-
bre la luna: tantos de-
dos/o pũtos se dira eclip
sar. Si seis/ medio. Si
tres quarto. si quatro/
tercio. si nueue/ tres q̃r-
tos. si ocho/ dos tercios.
¶ Ha se tambien d̃ no-
tar que aun q̃ el sol sea
mayor que la luna alas
vezes pesce la luna ma-
yor quel sol: y esto sera
q̃ndo el sol estuuiere en
el auge d̃l escẽtrico: y la
luna en el opposito del
auge del epiciclo. y quã
do assi parece lo puede
eclipsar

Doze ptes del diametro llamados dedos o puntos.

Diametro visual del sol y d̃la luna.



2. Grabado de *Breve compendio de la esfera y de la arte de navigar,* de Martín Cortés de Albacar, 1551.

Todos los ejemplos que he mencionado aquí ilustran otra característica del proceso de contar la historia. Lo natural es describir los acontecimientos clave refiriéndose a la obra de los individuos que marcaron un hito en la ciencia —Copérnico, Vesalio, Darwin, Wallace y los demás—. Pero esto no significa que la ciencia haya avanzado como resultado del trabajo de una serie de genios insustituibles dotados de una visión especial de cómo funciona el mundo. Pueden ser unos genios (aunque no siempre lo sean), pero ciertamente no son insustituibles. El progreso científico se construye paso a paso y, cuando llega el momento oportuno, como muestra el ejemplo de Darwin y Wallace, dos o más individuos, cada uno por su lado, pueden dar el paso siguiente. Es la suerte o un accidente histórico lo que decide cuál de ellos será recordado como descubridor de un fenómeno y pasará con su nombre a la posteridad. Mucho más importante que el genio humano es el desarrollo de la tecnología, y no es sorprendente que el comienzo de la revolución científica «coincida» con el desarrollo del telescopio y el microscopio.

Sólo se me ocurre una excepción parcial a esta situación, e incluso ese caso lo consideraría más especial de lo que lo consideran la mayoría de los historiadores de la ciencia. Isaac Newton fue claramente un caso especial, en parte por la amplitud de sus logros, pero sobre todo por la claridad con que fijó las reglas básicas con las que debía funcionar la ciencia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que Newton se basó también en sus predecesores inmediatos, particularmente en Galileo Galilei y René Descartes, y en este sentido sus contribuciones eran una consecuencia natural de los logros anteriores. Si Newton no hubiera vivido, el progreso científico podría haberse retrasado durante unas cuantas décadas. Pero sólo unas pocas décadas, porque Edmond Halley o Robert Hooke podrían haber dado con la famosa ley de la gravitación universal, donde se dice que la fuerza de atracción entre dos masas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa; de hecho, Gottfried Leibniz inventó el cálculo independientemente de Newton (y lo hizo mejor); y

la teoría ondulatoria de la luz de Christiaan Huygens, aun siendo excelente, quedó eclipsada porque Newton optó por hacerle la competencia con una teoría de partículas.

Nada de esto me impedirá contar buena parte de mi versión de la historia de la ciencia refiriéndome a las personas que participaron en ella, incluido Newton. Mi elección de los personajes que destacan en esta historia no pretende se exhaustiva, ni tampoco es mi intención que los comentarios sobre sus vidas y obras sean completos. He elegido pasajes que son representativos del desarrollo de la ciencia en su contexto histórico. Algunos de estos pasajes y los personajes que participan en ellos resultarán conocidos, pero otros (así lo espero) no tanto. La importancia de las personas y de sus vidas estriba en que reflejan la sociedad en la que vivieron, y al comentar, por ejemplo, el modo en que el trabajo de un científico determinado fue consecuencia del de otro, lo que pretendo es indicar el modo en que una «generación» de científicos influyó en la siguiente. Podría parecer que aquí surge necesariamente la pregunta sobre cómo rodó el balón por primera vez, es decir, sobre la «causa inicial». Pero en este caso es fácil encontrar la causa inicial: la ciencia occidental se puso en marcha porque existió el Renacimiento. Una vez que éste comenzó, con el impulso que recibió la tecnología quedó garantizado un progreso continuo que no se detendría. Las nuevas ideas científicas hicieron que la tecnología siguiera mejorando y esta tecnología más avanzada proporcionaba a los científicos los medios necesarios para comprobar sus nuevas teorías cada vez con mayor precisión. Primero llegó la tecnología, ya que es posible idear aparatos mediante un método de tanteo experimental, sin necesidad de comprender plenamente los principios en los que se basan. A partir de entonces, una vez que la ciencia y la tecnología empezaron a caminar unidas, el progreso se aceleró.

Dejaré a los historiadores la cuestión de debatir cómo, cuándo y dónde tuvo lugar el Renacimiento. Si queremos fijar una fecha para el comienzo del resurgimiento de la Europa occidental, sería adecua-

do elegir el año 1453, cuando los turcos tomaron Constantinopla (el 29 de mayo). Para entonces, muchos eruditos grecoparlantes, viendo la marea que se avecinaba, habían huido ya hacia el oeste (inicialmente a Italia), llevando consigo sus archivos de documentos. Allí, el estudio de toda aquella documentación fue asumido por el movimiento humanista italiano. Estos humanistas estaban interesados en utilizar las enseñanzas contenidas en los escritos clásicos para restaurar la civilización siguiendo las pautas que habían existido antes de los siglos oscuros. Estas iniciativas enlazan con bastante claridad el ascenso de la Europa moderna con la desaparición del último vestigio del antiguo Imperio Romano. Sin embargo, como muchos han indicado, un factor igualmente importante fue el despoblamiento que sufrió Europa a causa de la peste durante el siglo XIV y que indujo a los supervivientes a poner en cuestión de manera global los fundamentos de la sociedad, hizo que el salario de los trabajadores se encareciera y favoreció la invención de artilugios tecnológicos para sustituir la mano de obra. Pero falta todavía algo para completar la historia. El invento de los tipos móviles de imprenta por parte de Johannes Gutenberg a mediados del siglo XV tuvo un impacto evidente en lo que iba a ser la ciencia, y además entró en escena otro adelanto de la técnica: los barcos veleros capaces de cruzar los océanos, que trajeron a Europa algunos descubrimientos que iban a transformar la sociedad.

Poner una fecha al final del Renacimiento no es más fácil que fijar el comienzo —se podría decir que todavía continúa—. En números redondos se podría hablar de 1700, aunque desde la perspectiva actual una fecha aún más adecuada sería 1687, el año en que Isaac Newton publicó su gran obra Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Los principios matemáticos de la filosofía natural) *y, según dijo Alexander Pope, «se hizo la luz».*

Quiero matizar aquí que la revolución científica no se produjo de manera aislada y ciertamente no fue el móvil esencial del cambio, aunque la ciencia de múltiples formas (a pesar de su influencia en la

tecnología y en nuestra visión del mundo) se convirtió en la fuerza motora de la civilización occidental. Mi intención es mostrar cómo se desarrolló la ciencia, pero no dispongo aquí del espacio necesario para reflejar todo el trasfondo histórico, en igual medida que la mayoría de los libros de historia no tienen espacio para dar cuenta plenamente de la historia de la ciencia. Ni siquiera tengo espacio para reflejar aquí todos los eventos de la ciencia, por lo que el lector que desee profundizar en la historia de conceptos tan decisivos como la teoría cuántica, la evolución por selección natural o la tectónica de placas tendrá que consultar otros textos (incluidos los míos). La selección de acontecimientos que destaco aquí es necesariamente incompleta y, por consiguiente, hasta cierto punto subjetiva, pero mi propósito es ofrecer una idea de lo que sería el desarrollo completo de la ciencia en su alcance global, que nos ha llevado en unos 450 años desde la constancia de que la Tierra no se encuentra en el centro del universo y de que los seres humanos son «solamente» animales, hasta la teoría del *Big Bang* y el mapa completo del genoma humano.

En su *Nueva guía de la ciencia* (un tipo de libro muy distinto del que yo podría llegar a escribir), Isaac Asimov decía que la razón de intentar explicar la historia de la ciencia a los que no son científicos es que:

> Nadie puede realmente sentirse como en casa en el mundo moderno y valorar la naturaleza de sus problemas —y la posible solución de dichos problemas— salvo que tenga alguna noción inteligente sobre lo que la ciencia es capaz de explicar. Además, la iniciación al magnífico mundo de la ciencia proporciona una enorme satisfacción estética, anima a los jóvenes, satisface el deseo de saber y permite calibrar con mayor profundidad las maravillosas potencialidades y los logros asombrosos de la mente humana.[*]

Yo mismo no podría expresarlo mejor. La ciencia es uno de los mayores logros de la mente humana (se podría decir que es el mayor de todos), y el hecho de que los avances en realidad los hayan llevado a cabo en su mayor parte personas que tenían una inteligencia normal, avanzando paso a paso a partir del trabajo de sus predecesores, no hace menos destacable lo que aquí relatamos, sino que lo convier-

te en algo aún más notable. Prácticamente cualquiera de los lectores de este libro, si hubiera estado en el lugar adecuado en el momento oportuno, podría haber hecho los grandes descubrimientos de que hablamos aquí. Dado que el avance científico no ha llegado, ni mucho menos, a su punto final, es posible que alguno de los lectores se vea implicado en el próximo paso de la historia de la ciencia.

JOHN GRIBBIN
Junio de 2001

Primera Parte

LOS SIGLOS OSCUROS QUEDAN ATRÁS

Capítulo 1

LOS HOMBRES DEL RENACIMIENTO

Los siglos oscuros quedan atrás

El Renacimiento fue la época en la que los europeos occidentales perdieron el temor a los antiguos y se dieron cuenta de que podían contribuir a la civilización y a la sociedad tanto como habían contribuido los griegos y los romanos. Desde un punto de vista moderno, lo curioso no es que esto sucediera, sino que tuviera que pasar tanto tiempo para que la gente perdiera su complejo de inferioridad. Las razones precisas por las que se produjo este corte quedan más allá del alcance de este libro. Sin embargo, cualquiera que haya visitado los escenarios de la civilización clásica que quedan por todo el Mediterráneo puede hacerse una idea sobre la razón por la que se sentían así las personas de los siglos oscuros (aproximadamente de año 400 d. C. hasta el 900 d. C.) e incluso las de la Edad Media (más o menos entre los años 900 d. C. y 1400). Estructuras tales como el Partenón y el Coliseo romano siguen inspirando un gran respeto hoy en día, pero en una época en que se había perdido toda noción de cómo construir edificios semejantes es probable que se tuviera la impresión de que eran la obra de una especie humana en cierto modo diferente —o la obra de unos dioses—. Rodeados de tantas pruebas físicas de la habilidad aparentemente divina que pudieron poseer los antiguos, y con unos textos recientemente descubiertos a través de Bizancio en los que se ponían de manifiesto sus proezas intelectuales, habría sido

natural admitir que fueron intelectualmente muy superiores a la gente normal que vivió posteriormente, y también aceptar las enseñanzas de filósofos de la Antigüedad tales como Aristóteles y Euclides, considerándolas una especie de Sagradas Escrituras que no podían ponerse en cuestión. De hecho, así estaban las cosas al principio del Renacimiento. Dado que los romanos realizaron unas contribuciones muy escasas a la discusión de lo que podría llamarse una visión científica del mundo, se puede afirmar que la sabiduría que se recibió en la época renacentista en relación con la naturaleza del universo había permanecido invariable en lo esencial desde los grandes días de la antigua Grecia, es decir, desde aproximadamente 1500 años antes de que Copérnico entrara en escena. Sin embargo, una vez que se empezó a poner en tela de juicio aquellas ideas, el progreso se produjo con una rapidez enorme —después de quince siglos de estancamiento—, han transcurrido menos de cinco siglos desde la época de Copérnico hasta nuestros días. Es casi un tópico, aunque no deja de ser cierto, que un italiano típico del siglo X se habría sentido prácticamente como en casa en el siglo XV, pero a un italiano típico del siglo XV, el siglo XXI le parecería más extraño que la Italia de los césares.

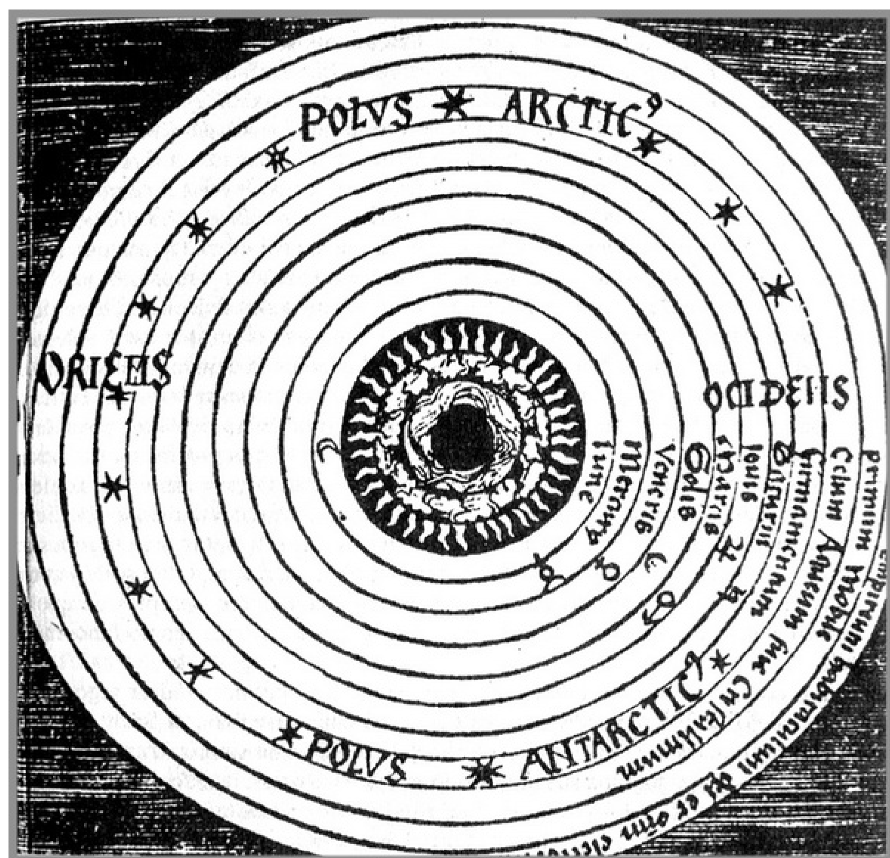
La elegancia de Copérnico

El propio Copérnico no fue sino una figura intermedia en el contexto de la revolución científica y, en gran medida, se parecía más a los antiguos filósofos griegos que a los científicos modernos. No realizó ningún tipo de experimento, ni siquiera hizo por sí mismo observaciones del universo (al menos no de manera significativa), y tampoco se planteó la posibilidad de que otros intentaran comprobar sus teorías. Su gran idea fue meramente eso, una idea, o lo que actualmente se suele llamar un «experimento mental», que mostraba un modo nuevo y más

sencillo de explicar la misma pauta de comportamiento de los cuerpos celestes que ya estaba explicada en aquel sistema, más complicado, que había desarrollado (o expuesto) Tolomeo. Si un científico moderno tiene una idea brillante sobre cómo funciona el universo, su primer objetivo es encontrar el modo de contrastar su teoría mediante experimentos o a través de la observación, para averiguar en qué medida es una buena descripción de la realidad. Sin embargo, este paso decisivo en el desarrollo del método científico no se daba en el siglo XV, y a Copérnico nunca se le ocurrió comprobar su teoría —su modelo mental del funcionamiento del universo— realizando por sí mismo nuevas observaciones o alentando a otros para que las hicieran. Copérnico pensaba que su modelo era mejor que el de Tolomeo porque, hablando en términos modernos, resultaba más elegante. La elegancia es a menudo un indicio fiable de la utilidad de un modelo, pero no es una prueba infalible. No obstante, en este caso resultó finalmente que la intuición de Copérnico era acertada.

Ciertamente al sistema de Tolomeo le faltaba elegancia. Tolomeo (conocido a veces como Tolomeo de Alejandría) vivió en el siglo II d. C., y se educó en un Egipto, que se encontraba desde hacía mucho tiempo bajo la influencia cultural de Grecia (como el propio nombre de la ciudad, Tolomeo pasó a los anales de la historia). Sin embargo, se conoce muy poco sobre su vida, pero entre las obras que dejó a la posteridad había un amplio compendio de astronomía basado en 500 años de pensamiento astronómico y cosmológico griego. Este libro se conoce habitualmente por su título en árabe, *Almagesto,* que significa «El más grande» y nos da una idea de la consideración de que disfrutó en los siglos posteriores; su título griego original lo denomina sencillamente «composición matemática». El sistema astronómico que describe está lejos de ser una idea original de Tolomeo. Más bien parece que recoge aquí y allá las ideas de los

antiguos griegos y las desarrolla. Sin embargo, da la impresión de que, a diferencia de Copérnico, Tolomeo llevó a cabo sus propias observaciones sobre los movimientos de los planetas, al mismo tiempo que se inspiraba en las de sus predecesores (también hizo una compilación de importantes mapas estelares).



3. Modelo ptolemaico que toma a la Tierra como centro del universo. *Margarita Philosophica*, de Reisch, 1503.

El sistema de Tolomeo se basaba en la idea de que los objetos estelares debían moverse describiendo círculos perfectos, por la sencilla razón de que los círculos son algo perfecto (éste es un ejemplo de cómo la elegancia no conduce necesariamente a la verdad). En aquella época había cinco planetas conocidos a

los que prestar atención (Mercurio, Venus, Marte, Saturno y Júpiter), además del Sol, la Luna y las estrellas. Con el fin de hacer que los movimientos observados en estos objetos encajaran en el requisito de ser siempre círculos perfectos, Tolomeo tuvo que realizar dos ajustes importantes en relación con la idea básica de que la Tierra ocupaba el centro del universo y todo lo demás giraba en torno a ella. El primero (en el que ya se había pensado mucho antes) era que el movimiento de cada planeta se pudiera describir diciendo que giraba en un pequeño círculo perfecto en torno a un punto que a su vez giraba en un gran círculo perfecto en torno a la Tierra. El círculo pequeño (en cierto modo «una rueda dentro de otra rueda») se llama epiciclo. El segundo ajuste, que aparentemente fue una idea original del propio Tolomeo, era la idea de que las grandes esferas de cristal (en este contexto «cristal» significa sencillamente «invisible») que contenían a los cuerpos celestes, transportándolos en círculos, no giraban realmente en torno a la Tierra, sino en torno a un conjunto de puntos situados en una posición ligeramente desviada con respecto a la de la Tierra y llamados «puntos ecuantes» (con el fin de explicar los detalles del movimiento de cada objeto celeste, decía que las distintas esferas giraban alrededor de diferentes puntos). A pesar de todo, la Tierra se consideraba el objeto central del universo, aunque todos los demás objetos giraran en torno a los puntos ecuantes y no alrededor de la Tierra. Cada uno de los grandes círculos centrados en los puntos ecuantes se llaman círculos deferentes.

Este modelo funcionaba en el sentido de que se podía utilizar para describir el modo en que el Sol, la Luna y los planetas parecen moverse sobre un fondo de estrellas fijas (entendiendo por «fijas» el hecho de que mantienen la misma distribución al moverse todas juntas alrededor de la Tierra), a las que se consideraba unidas a una esfera de cristal situada fuera del conjunto de esferas de cristal encajadas que transportan el resto de los

objetos alrededor de sus correspondientes puntos ecuantes. Sin embargo, no se intentó dar una explicación sobre los procesos físicos que hacen que todo se mueva de esta manera, ni sobre la naturaleza de las esferas de cristal. Además, se criticó a menudo este sistema por ser más complicado de lo debido, y también porque la necesidad de los puntos ecuantes hizo que muchos pensadores se sintieran incómodos —hacía que surgieran dudas en cuanto a si la Tierra debía ser considerada realmente como el centro del universo—. Incluso (si nos remontamos a Aristarco, en el siglo III a. C., o alguna que otra vez en los siglos posteriores a Tolomeo) se llegó a especular con la idea de que el Sol podría estar en el centro del universo y la Tierra se movería en torno a él. Pero estas teorías no encontraron aceptación, en gran medida porque iban en contra del «sentido común»: obviamente, algo tan sólido como la Tierra no podía estar en movimiento. Es uno de los mejores ejemplos de que es necesario evitar guiarse por el sentido común, si se desea averiguar cómo funciona el mundo.

Hubo dos estímulos específicos que impulsaron a Copérnico a idear algo mejor que el modelo de Tolomeo. Primero, que cada planeta, junto con el Sol y la Luna, tenía que ser tratado individualmente dentro del modelo, con su propia excentricidad con respecto a la Tierra y con sus propios epiciclos. No existía una descripción global coherente para explicar lo que sucedía con todos los objetos celestes. En segundo lugar, había un problema específico del que los científicos habían sido conscientes desde hacía mucho tiempo, pero que siempre habían escondido debajo de la alfombra. La excentricidad de la órbita de la Luna con respecto a la Tierra, necesaria para explicar los cambios de velocidad en el movimiento de la Luna a través del cielo, era tan grande que este satélite tendría que estar durante algunos días del mes mucho más cerca de la Tierra que durante otros días, por lo que su tamaño tendría que variar de una forma no-

table (y en una medida calculable), cosa que no sucedía en absoluto. El sistema de Tolomeo hace una predicción que se puede comprobar mediante la observación. Si esta comprobación falla, entonces no es una buena descripción del universo. Copérnico no pensaba exactamente de esta manera, pero ciertamente el problema de la Luna le hizo sentirse incómodo con el modelo de Tolomeo.

Nicolás Copérnico apareció en escena a finales del siglo XV. Había nacido en Torun, una ciudad polaca a orillas del Vístula, el 19 de febrero de 1473 y su nombre fue inicialmente Nikolai Koppernigk, pero luego lo latinizó, convirtiéndolo en Nicolaus Copernicus (una práctica que era habitual en aquella época, especialmente entre los humanistas del Renacimiento). Su padre, un rico comerciante, falleció en 1483 o 1484 y Nicolás creció en el hogar del hermano de su madre, Lukas Watzenrode, que llegó a ser el obispo de Ermeland. En 1491 (justo un año antes de que Cristóbal Colón emprendiera su primer viaje a América), Copérnico comenzó sus estudios en la Universidad de Cracovia, donde se supone que empezó a interesarse seriamente por la astronomía. En 1496 se trasladó a Italia, concretamente a Bolonia y Padua, donde estudió leyes y medicina, así como las materias habituales de cultura clásica y matemáticas, antes de recibir el doctorado en derecho canónico por la Universidad de Ferrara en 1503. Dado que era un auténtico hombre de su tiempo, Copérnico estuvo influenciado fuertemente por el movimiento humanista que se desarrollaba entonces en Italia y estudió las obras clásicas en que se basaba dicho movimiento. De hecho, en 1519 publicó una colección de cartas poéticas del escritor Theophilus Simokatta (un bizantino del siglo VII), que tradujo del original griego al latín.

Para cuando terminó su doctorado, Copérnico ya había sido nombrado canónigo de la catedral de Frombork (Frauenburg), en Polonia, por su tío Lukas —un caso típico de nepotismo por

el que accedió a un cómodo cargo retribuido que ocupó durante el resto de su vida—. Sin embargo, no regresó definitivamente a Polonia hasta 1506 (lo cual da una idea de lo poco absorbente que era el puesto de canónigo), donde trabajó como médico y secretario de su tío hasta que éste falleció en 1512. Tras la muerte del obispo, Copérnico prestó una mayor atención a sus obligaciones de canónigo, practicó la medicina y ocupó varios cargos civiles de menor importancia, todo lo cual le dejaba mucho tiempo libre para cultivar su interés por la astronomía. Sin embargo, a finales de la primera década del siglo XVI, ya había formulado sus revolucionarias teorías sobre el lugar de la Tierra en el universo.

¡La Tierra se mueve!

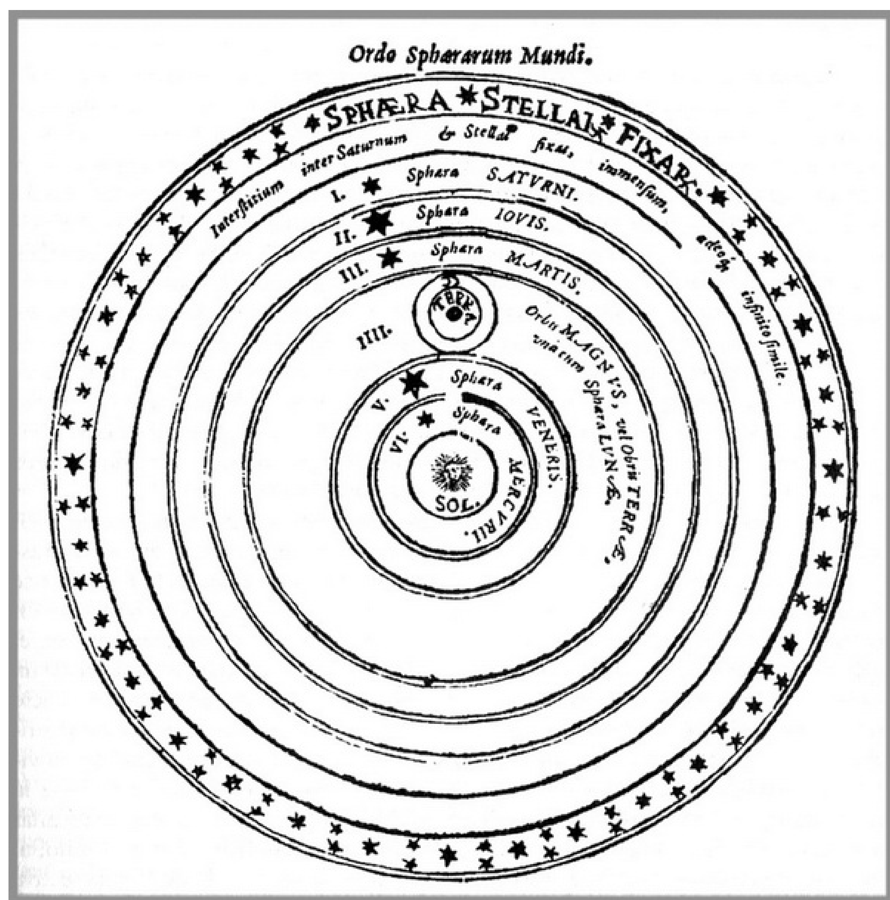
Estas teorías no surgieron de la nada, e incluso por lo que respecta a su importante contribución al pensamiento científico (considerada a veces como la más importante) Copérnico no era sino un hombre de su tiempo. La continuidad de la ciencia (y la arbitrariedad de las fechas de inicio de las etapas históricas) se pone de manifiesto claramente en el hecho de que Copérnico estuviera fuertemente influenciado por un libro que se publicó en 1496, justo en el momento preciso en que aquel estudiante de 23 años empezaba a interesarse por la astronomía. El alemán Johannes Müller (nacido en Königsberg en 1436 y conocido también como *Regiomontanus*, una versión latinizada del nombre de su lugar de nacimiento) era el autor de este libro, en el que desarrollaba las ideas de su predecesor y maestro Georg Peuerbach (nacido en 1423), quien a su vez (por supuesto) había recibido la influencia de otros científicos, y así sucesivamente en una cadena de influencias que se remonta a la noche de los tiempos. Peuerbach se había propuesto realizar un resumen moderno (es decir, actualizado al siglo XV) del *Alma-*

gesto de Tolomeo. La versión más moderna de que se disponía en aquel momento era una traducción al latín realizada en el siglo XII por Gerard de Cremona a partir de un texto árabe que, a su vez, se había traducido del griego largo tiempo atrás. El sueño de Peuerbach era actualizar esta obra partiendo de los textos griegos más antiguos que estuvieran disponibles en aquel momento (algunos de los cuales se encontraban entonces en Italia como consecuencia de la caída de Constantinopla). Desgraciadamente, Peuerbach falleció en 1461, antes de poder llevar a cabo esta tarea, aunque ya había comenzado a escribir un libro previo en el que se resumía la edición del *Almagesto* que estaba disponible en aquel momento. En su lecho de muerte, Peuerbach hizo que Regiomontano le prometiera terminar la tarea, y éste así lo hizo, aunque no fue exactamente una nueva traducción de la obra de Tolomeo. Sin embargo, Regiomontano hizo que fuera en gran medida incluso mejor: escribió su libro titulado el *Epítome*, que no sólo recogía todo el contenido del *Almagesto*, sino que añadía detalles de observaciones posteriores relativas a los cuerpos celestes, revisaba algunos de los cálculos de Tolomeo e incluía algunos comentarios críticos en el texto (lo que constituye en sí una muestra de que el hombre del Renacimiento actuaba con la confianza de estar en pie de igualdad con los antiguos). Estos comentarios críticos incluyen un pasaje en el que se llama la atención con respecto a una cuestión clave que ya hemos mencionado: el hecho de que el tamaño aparente de la Luna en el cielo no cambia de la manera que exige el sistema de Tolomeo. Regiomontano falleció en 1476 y el *Epítome* no se publicó hasta veinte años después de su muerte, pero su publicación llegó a tiempo para poner en marcha el pensamiento del joven Copérnico. Si este libro hubiera aparecido antes de la muerte de Regiomontano, es muy probable que algún otro hubiera tomado el testigo (Copérnico tenía en 1476 sólo tres años de edad).

Tampoco Copérnico era de los que se apresuraban a llevar sus teorías a la imprenta. Sabemos que su modelo del universo estaba ya completo en lo esencial hacia 1510, porque muy poco después de esta fecha circulaba entre sus amigos más íntimos un resumen de estas teorías en un manuscrito titulado *Commentariolus (Breve comentario)*. No hay pruebas de que Copérnico se sintiera demasiado preocupado por el riesgo de ser perseguido por la Iglesia si publicaba sus ideas de una manera más formal —de hecho, se habló del *Commentariolus* en una conferencia que dio en el Vaticano el secretario del Papa, Johann Widmanstadt, a la que asistieron el propio papa Clemente VII y varios cardenales—. Uno de estos cardenales, Nicholas von Schónberg, escribió a Copérnico urgiéndole a que lo publicara, y la carta se incluyó al comienzo de su obra maestra *De Revolutionibus Orbium Coelestium (Sobre la revolución de las esferas celestes)* cuando se publicaron finalmente las teorías de Copérnico en 1543.

Entonces, ¿por qué retrasó Copérnico la publicación? Hubo dos factores. En primer lugar, Copérnico estaba bastante ocupado. Puede ser cierto que su puesto de canónigo fuera poco absorbente, pero esto no significa que quisiera quedarse sentado y disfrutar de sus ingresos, dedicarse superficialmente a la astronomía y no preocuparse de lo que pasara en el mundo exterior. Como médico, Copérnico trabajó tanto para la comunidad religiosa constituida en torno a la catedral de Frombork, como para los pobres (por supuesto, sin cobrar nada a estos últimos). Como matemático, trabajó en un plan para reformar el sistema monetario (no siendo la última vez que un científico famoso asumía esta tarea), y con su conocimiento de las leyes prestó buenos servicios a la diócesis. También se vio obligado a prestar servicios inesperadamente cuando los caballeros teutones (una orden religiosa y militar, al estilo de los cruzados, que tenía bajo su control los estados orientales del Báltico y Prusia)

invadieron la región en 1520. Copérnico tuvo que asumir el mando de un castillo en Allenstein y defendió la ciudad contra los invasores durante varios meses. Verdaderamente, fue un hombre muy ocupado.



4. Una de las primeras versiones del universo heliocéntrico. *Narratio Prima*, de Rheticus, 1596.

Además, hubo una segunda razón para que fuera reacio a publicar. Copérnico sabía que su modelo del universo plantearía nuevas cuestiones, aunque no resolviera viejos enigmas —y, de hecho, sabía que no resolvía todos los viejos enigmas—. Como ya hemos dicho, Copérnico no realizó muchas observaciones (aunque supervisó la construcción de una torre sin tejado para

usarla como observatorio). Fue un pensador y un filósofo más al estilo de los antiguos griegos que al de los científicos modernos. Lo que más le preocupaba en relación con el sistema de Tolomeo, caracterizado por el enigma de la Luna, era la cuestión de los ecuantes. No podía aceptar esta idea, sobre todo por el hecho de que fuera necesaria la existencia de distintos ecuantes para los diferentes planetas. En ese caso, ¿dónde estaba el auténtico centro del universo? Copérnico deseaba un modelo en el que todo se moviera alrededor de un único centro a una velocidad invariable, y este deseo se basaba en razones estéticas, en la misma medida en que podía tener motivaciones de otro tipo. Su modelo pretendía ser un modo de conseguir esto, pero falló por sus propias condiciones. Colocar el Sol en el centro del universo suponía dar un gran paso, pero aún era necesario que la Luna describiera su órbita alrededor de la Tierra y todavía faltaban los epiciclos para explicar por qué los planetas parecían acelerarse y desacelerarse mientras recorrían sus órbitas.

Los epiciclos eran el modo de explicar las desviaciones con respecto a un movimiento perfectamente circular, manteniendo al mismo tiempo que no se producían desviaciones con respecto al movimiento perfectamente circular. Pero el mayor problema que planteaba la visión copernicana del mundo era el de las estrellas. Si la Tierra describía una órbita alrededor del Sol y las estrellas estaban fijas en una esfera de cristal situada fuera de la esfera que transportaba al planeta más distante, el movimiento de la Tierra debería originar un movimiento aparente de las propias estrellas —un fenómeno conocido como paralaje—. Si viajamos en coche por una carretera, nos parece ver que el mundo exterior se mueve con respecto a nosotros. Si estamos en la Tierra y ésta se mueve, ¿por qué no vemos las estrellas en movimiento? Parecía que la única explicación posible era que las estrellas se encontraran mucho más alejadas que los

planetas, al menos cientos de veces más lejos, de tal forma que el efecto del paralaje fuera demasiado pequeño para ser percibido. Pero ¿por qué dejaría Dios entre el planeta más externo y las estrellas un enorme espacio vacío, al menos cientos de veces mayor que los intervalos existentes entre los planetas?

El movimiento de la Tierra daba lugar también a otros problemas preocupantes. Si la Tierra se mueve, ¿por qué no se nota un vendaval constante, como el viento que arrastra los cabellos cuando viajamos en un descapotable por una autopista? ¿Por qué este movimiento no hace que los océanos se agiten, produciendo grandes maremotos? En realidad, ¿por qué no sacude la Tierra hasta hacerla añicos? Recordemos que en el siglo XVI el movimiento se asociaba con ir galopando sobre un caballo o viajar en un coche por caminos llenos de baches. El concepto de movimiento sobre una superficie lisa (aunque sólo sea tan lisa como el firme de una autopista) tenía que ser muy difícil de imaginar sin haber conocido ninguna experiencia directa de tal tipo de movimiento —incluso en el siglo XIX preocupaba seriamente la idea de que viajar a la velocidad de un ferrocarril, que sería de unos 25 kilómetros por hora, podría resultar perjudicial para la salud de las personas—. Copérnico no era físico y, por lo tanto, ni siquiera intentó dar respuesta a estas cuestiones, pero sabía que, desde la perspectiva del siglo XVI, estos aspectos no aclarados generaban dudas sobre sus teorías.

Existía además otro problema, pero quedaba totalmente fuera del alcance de los conocimientos del siglo XVI. Si el Sol está en el centro del universo, ¿por qué no caen todos los objetos sobre él? Lo único que Copérnico podía decir al respecto era que los objetos «terrestres» tenían tendencia a caer sobre la Tierra, los objetos solares tenían tendencia a caer sobre el Sol, los objetos relacionados con Marte caerían sobre Marte, y así según los casos. En realidad, lo que quería decir con esto era «no sabemos qué pasa». Sin embargo, una de las lecciones más

importantes aprendida durante los siglos transcurridos desde la época de Copérnico es que no hace falta que un modelo científico explique todo para que sea considerado como un buen modelo.

Tras la llegada de Georg Joachim von Lauchen (conocido también como Rheticus) a Frombork durante la primavera de 1539, Copérnico, a pesar de sus dudas y de tener su tiempo muy ocupado, se convenció de que debía recopilar sus teorías de tal forma que pudieran ser publicadas. Rheticus, que era profesor de matemáticas en la Universidad de Wittemberg, tuvo noticias de los trabajos de Copérnico y fue a Frombork específicamente para aprender más sobre dichos trabajos. Al darse cuenta de su importancia, se propuso conseguir que el maestro los publicara. Se pusieron ambos de acuerdo y en 1540 Rheticus publicó un opúsculo titulado *Narratio Prima de Librus Revolutionum Copernici* en el que se resumía la característica principal del modelo de Copérnico: el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Finalmente, Copérnico accedió a publicar su gran libro, aunque para entonces era ya un anciano (o quizá por eso mismo). Rheticus se encargó de supervisar la impresión del libro en Nuremberg, ciudad donde residía, pero, según se ha comentado a menudo, las cosas no resultaron del todo como él se proponía. Antes de que el libro estuviera totalmente preparado para enviarlo a la imprenta, Rheticus tuvo que marcharse de Nuremberg para tomar posesión de un nuevo cargo en Leipzig, por lo que encargó la tarea a Andreas Osiander, un pastor luterano, que añadió por su cuenta un prólogo no firmado en el que se explicaba que el modelo descrito en el libro no pretendía ser una descripción de cómo era realmente el universo, sino meramente un instrumento matemático para simplificar los cálculos relativos a los movimientos de los planetas. Siendo luterano, Osiander tenía muchas razones para temer que el libro pudiera no ser bien recibido, ya que incluso antes de su publi-

cación el propio Martín Lutero (que fue casi contemporáneo de Copérnico: vivió entre 1483 y 1546) había formulado objeciones al modelo copernicano, pregonando que la Biblia dice que fue al Sol, y no a la Tierra, a quien Josué ordenó detenerse.

Copérnico no tuvo ocasión de plantear queja alguna en relación con el prólogo, ya que falleció en 1543, justo el año en que se publicó su gran obra. Hay una anécdota conmovedora, pero probablemente apócrifa, según la cual recibió una copia en su lecho de muerte, pero, tanto si esto es cierto como si no, el libro se quedó sin alguien que pudiera defender las teorías, salvo quizás el infatigable Rheticus, que falleció en 1576.

Lo curioso es que el punto de vista de Osiander coincide en gran medida con la visión científica moderna del mundo. Todas las ideas que tenemos actualmente sobre el modo en que funciona el universo se aceptan sencillamente como modelos que se proponen para explicar lo mejor posible las observaciones y los resultados de los experimentos. Hay un aspecto en el que es aceptable considerar la Tierra como el centro del universo y realizar todas las mediciones en relación con nuestro planeta. Esto funciona bastante bien, por ejemplo, para planificar el vuelo de un cohete que vaya a la Luna. Sin embargo, este modelo se vuelve cada vez más complicado a medida que intentemos describir el comportamiento de objetos del sistema solar que estén cada vez más alejados de la Tierra. Cuando se hacen los cálculos para el vuelo de una sonda espacial que se dirija, por ejemplo, hacia Saturno, los científicos de la NASA consideran en efecto que el Sol está en el centro del universo, aunque sepan que el Sol describe a su vez una órbita en torno al centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. En general, los científicos utilizan el modelo más sencillo posible que sea coherente con todos los hechos relativos a un conjunto determinado de circunstancias, y no todos utilizan siempre el mismo modelo. Decir que la idea de que el Sol está en el centro del universo es sólo

un modelo que facilita los cálculos en los que intervienen las órbitas de los planetas, es algo con lo que cualquier científico planetario estaría de acuerdo actualmente. La diferencia está en que Osiander no esperaba que sus lectores (mejor dicho, los lectores de Copérnico) aceptaran el punto de vista igualmente válido según el cual decir que la Tierra está en el centro del universo es únicamente un modelo que resulta práctico para realizar cálculos sobre el movimiento aparente de la Luna.

No podernos decir si el prólogo de Osiander consiguió aplacar en el Vaticano a algún oponente alborotado, pero todos los indicios apuntan a que allí no surgió ningún oponente alborotado al que fuera necesario aplacar. La publicación de *De Revolutionibus* fue aceptada por la Iglesia Católica prácticamente sin un solo murmullo y, durante el resto del siglo XVI, Roma ignoró ampliamente este libro. De hecho, al principio fue ampliamente ignorado por la mayoría de las personas —la edición inicial de cuatrocientas copias no llegó a agotarse—. Ciertamente el prólogo de Osiander no aplacó a los luteranos y el libro fue condenado rotundamente por el movimiento protestante europeo. Sin embargo, hubo un lugar donde *De Revolutionibus* fue bien recibido y todas sus implicaciones fueron apreciadas, al menos por los entendidos: esto sucedió en Inglaterra, donde Enrique VIII contrajo matrimonio con su última esposa, Catalina Parr, el mismo año en que el libro se publicó.

LAS ÓRBITAS DE LOS PLANETAS

Lo que resultaba especialmente impresionante entre todo lo que contenía el modelo del universo de Copérnico era que, poniendo a la Tierra en órbita alrededor del Sol, los planetas quedaban automáticamente situados en una sucesión lógica. Desde tiempos remo tos, había sido un enigma que Mercurio y Venus sólo se vieran desde la Tierra al amanecer y al anochecer, mien-

tras que los otros tres planetas conocidos resultaban visibles a cualquier hora de la noche. La explicación de Tolomeo (o, más bien, la explicación ya conocida que resumió en el *Almagesto*) decía que Mercurio y Venus «acompañaban» al Sol mientras éste se desplazaba alrededor de la Tierra describiendo una órbita completa cada año. Pero, según el sistema copernicano, era la Tierra la que daba una vuelta alrededor del Sol cada año, y la explicación de los dos tipos de movimiento planetario consistía en decir sencillamente que las órbitas de Mercurio y Venus se encontraban dentro de la órbita de la Tierra (más cerca del Sol que nuestro planeta), mientras que las órbitas de Marte, Júpiter y Saturno estaban fuera de la órbita de la Tierra (más alejadas del Sol que la de nuestro planeta). Teniendo en cuenta el movimiento de la Tierra, Copérnico pudo calcular cuánto tiempo tarda cada planeta en recorrer su órbita alrededor del Sol. Estos períodos formaban una clara sucesión a partir del de Mercurio, que tiene el «año» más corto, pasando por Venus, la Tierra, Marte y Júpiter, para llegar hasta Saturno, que tiene el «año» más largo.

Pero esto no era todo. En el modelo de Copérnico, la pauta de comportamiento observada en los planetas está relacionada también con la proporción entre sus distancias al Sol y la distancia de la Tierra a dicho astro. Incluso sin conocer en términos absolutos ninguna de las distancias de los planetas al Sol, Copérnico pudo ordenar los planetas según le orden creciente de sus distancias al Sol. La sucesión resultante fue la misma que se deducía de los períodos anteriormente mencionados: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Esto indicaba claramente que se había descubierto una verdad profunda sobre la naturaleza del universo. Para aquellos que quisieran verlo, en la astronomía de Copérnico había mucho más que la simple afirmación de que la Tierra gira alrededor del Sol.

Uno de los pocos que vieron claramente las implicaciones del modelo de Copérnico poco después de la publicación de *De Revolutionibus* fue el astrónomo inglés Thomas Digges. Digges no sólo fue un científico, sino también uno de los primeros divulgadores de la ciencia —no exactamente el primero, ya que seguía en cierto modo los pasos de su padre, Leonard—. Leonard Digges nació hacia 1520, pero se sabe muy poco sobre los primeros años de su vida. Estudió en la Universidad de Oxford y llegó a ser muy conocido como matemático y agrimensor. Fue autor de varios libros escritos en inglés —algo muy inusual en la época. El primero de sus libros, a *General Prognostication*, se publicó en 1553, diez años después de aparecer *De Revolutionibus*, y en parte gracias a que resultaba muy accesible por estar escrito en la lengua vernácula, se convirtió en un *best seller*, a pesar de estar ya anticuado en un aspecto crucial. Leonard Digges incluía en su libro un calendario perpetuo, unas colecciones de conocimientos meteorológicos y gran cantidad de cuestiones astronómicas, incluso una descripción del modelo tolomeico del universo —en cierto modo, este libro no era muy diferente de los almanaques para granjeros que se hicieron muy populares en siglos posteriores.

En el contexto de su trabajo como agrimensor, hacia 1551 Leonard Digges inventó el teodolito. Por aquel tiempo, su interés por conseguir ver con precisión a grandes distancias le llevó a inventar el telescopio de reflexión (y, casi con toda seguridad, también el telescopio de refracción), aunque en aquella época no se dio publicidad alguna a estos inventos. Una razón por la que estas ideas no llegaron a desarrollarse fue que la carrera de Digges padre finalizó abruptamente en 1554, cuando tomó parte en la fracasada rebelión encabezada por el protestante *sir* Thomas Wyatt contra la nueva reina de Inglaterra, la católica

reina María, que había accedido al trono en 1553, a la muerte de su padre, Enrique VIII. Inicialmente, Leonard Digges fue condenado a muerte por su participación en la rebelión, pero le fue conmutada la sentencia, aunque le confiscaron todas sus propiedades y pasó el resto de sus días (falleció en 1559) luchando infructuosamente por recuperarlas.

Cuando Leonard Digges murió, su hijo Thomas tenía aproximadamente 13 años (no conocemos la fecha exacta de su nacimiento) y estaba bajo la custodia de su tutor, John Dee. Dee fue el típico «filósofo natural» del Renacimiento: un buen matemático, estudiante de alquimia, filósofo y (algo que no era tan típico) astrólogo de la reina Isabel I, que subió al trono en 1558. Puede que fuera, como Christopher Marlowe, agente secreto de la corona. Según dicen, fue también uno de los primeros entusiastas del modelo de Copérnico, aunque Dee no publicó nada sobre este asunto. Por educarse en casa de Dee, Thomas Digges tuvo acceso a una biblioteca en la que había más de mil manuscritos, que devoró antes de publicar su primer a obra sobre matemáticas en 1571, el mismo año en que se encargó de la publicación de un libro póstumo escrito por su padre (*Pantometria*), que dio lugar al primer debate público sobre la invención del telescopio por Leonard Digges. En el prólogo del libro, Thomas Digges dice lo siguiente:

> Mi padre, mediante continuas prácticas de gran dificultad, acompañadas de demostraciones matemáticas, consiguió varias veces, utilizando lentes proporcionales debidamente situadas en ángulos adecuados, no sólo descubrir objetos alejados, leer cartas, numerar monedas con su auténtico valor e inscripción de las mismas colocadas a propósito por algunos de sus amigos sobre lomas situadas en campo abierto, sino también declarar lo que se había hecho en un momento determinado en lugares privados que se encontraban a siete millas de distancia.[*]

Thomas Digges se dedicó también él mismo a estudiar los cielos y realizó observaciones de una supernova vista en 1572, siendo utilizadas posteriormente algunas de estas observaciones por Tycho Brahe en su análisis de aquel fenómeno.

Sin embargo, la publicación más importante de Thomas Digges apareció en 1576. Se trataba de una nueva edición ampliamente revisada del primer libro de su padre, en aquella ocasión con el título *Prognostication Everlasting*, que incluía una discusión detallada del modelo copernicano del universo —la primera descripción de este modelo en inglés—. Pero Digges fue más lejos que Copérnico. En este libro afirmaba que el universo es infinito e incluía un diagrama en el que mostraba el Sol en el centro, con los planetas girando en órbitas alrededor de él, y representaba una multitud de estrellas que se extendían hacia el infinito en todas las direcciones. Fue un asombroso salto hacia lo desconocido. Digges no dio razones que justificaran esta afirmación, pero parece muy probable que hubiera estado observando la Vía Láctea con un telescopio y que la multitud de estrellas que vio allí le convencieran de que las estrellas y otros soles se extendían profusamente por todo un universo infinito.

Sin embargo, Digges no dedicó su vida por completo a la ciencia, como tampoco lo hizo Copérnico, y no continuó desarrollando estas teorías. Por sus antecedentes como hijo de un destacado protestante que había sufrido a manos de la reina María y por sus vínculos con la familia Dee (situada bajo la protección de la reina Isabel I), Thomas Digges llegó a ser miembro del Parlamento, cargo que ostentó en dos ocasiones diferentes, y consejero del Gobierno. También prestó servicios como general de las tropas británicas en los Países Bajos entre 1586 y 1593, donde apoyó a los protestantes holandeses en su lucha por liberarse del dominio de la católica España. Falleció en 1595. Para entonces, Galileo Galilei era ya profesor de matemáticas en Padua y la Iglesia Católica estaba adoptando una posición contraria al modelo copernicano del universo porque el hereje Giordano Bruno lo estaba defendiendo. Bruno estaba

implicado en un largo juicio que le llevaría a morir quemado en la hoguera en 1600.

GIORDANO BRUNO: ¿UN MÁRTIR DE LA CIENCIA?

Es interesante que mencionemos aquí a Giordano Bruno, antes de retomar el hilo para hablar de la obra de Tycho Brahe, Johannes Kepler y Galileo, que desarrollaron la obra de Copérnico. El motivo de que convenga hablar de Bruno es que a menudo se piensa que murió en la hoguera a causa de su apoyo al modelo de Copérnico. La realidad es que era un hereje y fue quemado en la hoguera por sus creencias religiosas. El hecho de que el modelo de Copérnico se viera implicado en todo este asunto no fue más que una complicación desafortunada.

La razón principal por la que Giordano Bruno, que había nacido en 1548, entró en conflicto con la Iglesia fue el hecho de ser seguidor de un movimiento conocido como «hermetismo». Este movimiento religioso basaba sus creencias en unos textos que para sus seguidores eran el equivalente de las Sagradas Escrituras y que en los siglos XV y XVI estaban considerados como procedentes de Egipto y elaborados allí en los tiempos de Moisés. Estaban relacionados con las enseñanzas del dios egipcio Tot (el creador de las artes y de las ciencias). Hermes era el equivalente griego de Tot (de ahí la palabra *hermetismo*) y los seguidores de este culto le daban el nombre de Hermes Trimegisto (tres veces grande). Por supuesto, el Sol era también un dios para los egipcios, y se ha sugerido que el propio Copérnico pudo haber estado influido por el hermetismo al poner el Sol en el centro del universo, aunque no hay indicios que justifiquen esta hipótesis.

No hay espacio en este libro para profundizar en los detalles del hermetismo (especialmente porque se averiguó posteriormente que los documentos en que se basó no procedían del An-

tiguo Egipto), pero los creyentes del siglo XV interpretaban que aquellos documentos predecían, entre otras cosas, el nacimiento de Cristo. En la década de 1460, unas copias del material en que se basaba el hermetismo llegaron a Italia procedentes de Macedonia y suscitaron un gran interés durante más de un siglo, hasta que se demostró (en 1614) que habían sido escritas mucho tiempo después del comienzo de la era cristiana, por lo que sus «profecías» se habían beneficiado en gran medida de las ventajas de la percepción retrospectiva.

La Iglesia Católica de finales del siglo XVI podía tolerar textos antiguos que predijeran el nacimiento de Jesús, y hubo católicos perfectamente respetables, por ejemplo Felipe II de España (que reinó desde 1556 hasta 1598, se casó con la reina María de Inglaterra y fue un firme adversario del protestantismo), que suscribían estas creencias (como también lo hacía, dicho sea de paso, John Dee, el tutor de Thomas Digges). Pero Giordano Bruno adoptó una posición extrema, afirmando que la antigua religión egipcia era la fe verdadera y que la Iglesia Católica debía encontrar un modo de regresar a aquellas creencias antiguas. No hace falta decir que esto no cayó demasiado bien en Roma y, después de una carrera con altibajos vagando por Europa (incluida una temporada en Inglaterra desde 1583 hasta 1585) y provocando escándalos (entró en la orden dominicana en 1565, pero fue expulsado de ella en 1576 y, durante su estancia en Inglaterra se creó tantos enemigos que tuvo que refugiarse en la embajada francesa), Bruno cometió el error de visitar Venecia en 1591, donde fue arrestado y entregado a la Inquisición. Tras pasar mucho tiempo en prisión y soportar un largo proceso, parece ser que Giordano Bruno fue condenado finalmente tras ser acusado de arrianismo (la creencia en que Cristo había sido creado por Dios y no era el dios encarnado) y de practicar la magia en secreto. No podemos estar completamente seguros porque las actas del proceso se han extraviado,

pero más que un mártir de la ciencia, como se le suele presentar a menudo, Bruno fue en realidad un mártir de la magia.

La Iglesia Católica prohíbe el modelo copernicano

Aunque su destino, como el de muchos mártires, puede resultar muy duro según la mentalidad moderna, Giordano Bruno, hasta cierto punto, se lo buscó él mismo, ya que se le dio todo tipo de oportunidades para que rectificara (siendo ésta una de las razones por las que estuvo detenido durante tanto tiempo antes de ser condenado). No hay pruebas de que su apoyo a las teorías de Copérnico se mencionara en el juicio, pero está claro que Bruno era un defensor apasionado de la teoría de un universo centrado en el Sol (porque esta teoría encajaba con la visión egipcia del mundo) y que también aceptó con entusiasmo la teoría de Thomas Digges según la cual el universo estaría salpicado por una serie infinita de estrellas, cada una de ellas parecida al Sol, y además argumentó que debía haber vida en algún otro lugar del universo. Por el impacto que produjeron las ideas de Bruno en su época y porque fue condenado por la Iglesia, se consideró que estas teorías podían meterse todas ellas en el mismo saco. Con su habitual lentitud, la Iglesia tardó varios años, hasta 1616, en incluir *De Revolutionibus* en el Índice de libros prohibidos (y hubo que esperar hasta 1835 para que lo borrara de dicho Índice). A partir de 1600, las teorías copernicanas fueron desaprobadas expresamente por la Iglesia, y el hecho de que Bruno suscribiera estas teorías y fuera quemado en la hoguera por hereje difícilmente podía animar a alguien a continuar en la misma línea. Éste era el caso de Galileo, que vivía en Italia a principios de la década de 1600 y estaba interesado en averiguar cómo funcionaba el mundo. De no haber sido por Bruno, las teorías de Copérnico nunca habrían sido objeto de una atención tan hostil por parte de las autoridades, Ga-

lileo no habría sufrido persecución y el progreso de la ciencia en Italia podría haberse desarrollado con menos complicaciones.

Sin embargo, la historia de Galileo tendrá que esperar mientras nos ocupamos de otro gran avance de la ciencia que se produjo durante el Renacimiento: el estudio del cuerpo humano.

Vesalio: cirujano, disector y ladrón de tumbas

Del mismo modo que la obra de Copérnico se desarrolló a partir del momento en que los europeos occidentales redescubrieron la obra de Tolomeo, también los trabajos de Andrés Vesalio (o Andreas Vesalius) de Bruselas se desarrollaron a partir del redescubrimiento de la obra de Galeno (Claudius Galenus). Cierto es que ninguna de estas grandes obras de la Antigüedad llegó a perderse realmente en ningún momento, ya que fueron conocidas por las civilizaciones bizantina y árabe, incluso durante los siglos oscuros que vivió el Occidente europeo; pero el resurgimiento del interés por estos escritos (tipificados por el movimiento humanista en Italia y llegados, tras la caída de Constantinopla, gracias a la difusión, en la época del Renacimiento, de documentos originales y traducciones hacia el oeste, hasta Italia y más lejos aún) fue un factor que contribuyó a espolear los comienzos de la revolución científica. No es que este fenómeno les pareciera una revolución a las personas que participaron en sus primeras fases —el propio Copérnico y también Vesalio se vieron a sí mismos como unos estudiosos que retomaban los hilos de la antigua sabiduría y construían sus obras partiendo de ella, en vez de descartar las enseñanzas de los antiguos y comenzar de nuevo—. Este proceso era en conjunto mucho más evolutivo que revolucionario, especialmente durante el siglo XVI. La revolución real, como ya hemos mencionado, fue el cambio de mentalidad que hizo que los eruditos

renacentistas se vieran a sí mismos equiparados a los sabios antiguos y capaces de seguir avanzando a partir de las enseñanzas de personas como Tolomeo y Galeno —constatando que las personas como Tolomeo y Galileo eran sencillamente seres humanos—. Fue la obra de Galileo, y especialmente la de Newton, lo que hizo que todo el proceso de investigación sobre el mundo, como veremos más adelante, cambiara realmente en un sentido revolucionario, superando los modos de trabajar de los filósofos antiguos para adoptar los métodos de la ciencia moderna.

Galeno fue un médico griego nacido alrededor del año 130 d. C. en Pérgamo (actualmente Bergama), en la zona de Asia Menor que corresponde ahora a Turquía. Vivió hasta finales del siglo II d. C., o quizás hasta principios del siglo III. Como hijo de un rico arquitecto y granjero que vivía en una de las ciudades más prósperas de la zona grecoparlante del Imperio Romano, Galeno gozó de todas las ventajas que se podía tener en la vida y recibió la educación más esmerada, orientada hacia el estudio de la medicina porque, cuando Galeno tenía 16 años, su padre tuvo un sueño en el que se predecía el éxito del hijo en este campo. Galeno estudió medicina en diversos centros, entre otros los de Corinto y Alejandría; fue médico jefe de los gladiadores de Pérgamo durante cinco años a partir del año 157 d. C., trasladándose luego a Roma, donde finalmente se convirtió en médico personal y amigo del emperador Marco Aurelio. También estuvo al servicio de Cómodo, que era hijo de Marco Aurelio y llegó a ser emperador a la muerte de su padre en el año 180 d. C. Fueron tiempos turbulentos para Roma, con guerras más o menos constantes en las fronteras del Imperio (el muro de Adriano se construyó unos pocos años antes del nacimiento de Galeno), pero aún faltaba mucho tiempo para que el Imperio entrara en un grave declive (no se dividió en el Imperio de Oriente y el Imperio de Occidente hasta el 286 d. C., y Cons-

tantinopla no se fundó hasta el 330 d. C.). Galeno, que estaba seguro en el centro del Imperio a pesar de los problemas de las fronteras, fue un escritor prolífico y, como Tolomeo, recopiló las enseñanzas de sabios anteriores a los que admiraba, sobre todo las de Hipócrates (de hecho, la idea moderna de situar a Hipócrates como padre de la medicina es una consecuencia casi exclusiva de los escritos de Galeno). También fue un hombre odioso que hacía publicidad de sí mismo y plagiaba a otros —una de las cosas más amables que dijo sobre sus colegas de Roma fue que eran unos «individuos moqueantes»—.[1] Sin embargo, no hay que dejar que su desagradable personalidad oscurezca sus logros reales: Galeno merece la fama por su habilidad para la disección y por los libros que escribió sobre la estructura del cuerpo humano. Por desgracia (y como cosa extraña, dada la actitud que se adoptaba con respecto a los esclavos y a los combates de gladiadores), la disección humana se desaprobaba en aquella época, por lo que Galeno realizó la mayor parte de sus trabajos utilizando perros, cerdos y monos (aunque hay pruebas de que diseccionó algunos cuerpos humanos). Por lo tanto, sus conclusiones sobre el cuerpo humano se basaban sobre todo en el estudio de animales y en muchos aspectos eran incorrectas. Dado que, según parece, en los doce o trece siglos siguientes nadie hizo investigaciones serias sobre anatomía, la obra de Galeno estuvo considerada como la última palabra en anatomía humana hasta bien entrado el siglo XVI.



5. Andreas Vesalius (o Andrés Vesalio), según su *De Humani Corporis Fabrica,* 1543.

El resurgimiento de la obra de Galeno fue una de las consecuencias de la obsesión humanista por todo lo griego. En el terreno religioso, no sólo el movimiento protestante del siglo XVI, sino también algunos católicos, creían que la doctrina de Dios había sido corrompida por los siglos de interpretaciones y enmiendas practicadas en los textos bíblicos desde la época de Jesús y se produjo una corriente fundamentalista de retorno a la Biblia como autoridad última. Parte de este proceso incluía el estudio de las primeras traducciones griegas de la Biblia en sus-

titución de las versiones latinas. Aunque la idea de que desde la Antigüedad no había sucedido nada que valiera la pena era un poco exagerada, había ciertamente algo de verdad en la creencia de que un texto de medicina que hubiera sido corrompido al sufrir varias traducciones (algunas de ellas se habían hecho a partir de textos en árabe traducidos del griego) y ser copiado por muchos escribientes podía ser menos preciso de lo que sería deseable, por lo que constituyó un hito crucial dentro de la medicina el hecho de que las obras de Galeno se publicaran en su versión original griega en 1525. Paradójicamente, dado que casi ningún médico podía leer en griego, lo que los médicos estudiaron fueron las nuevas traducciones al latín realizadas a partir de esta edición griega de 1525. Sin embargo, gracias a estas traducciones y al invento de la imprenta, la obra de Galeno se difundió duran te los diez años siguientes mucho más ampliamente que en ninguna otra época anterior. Precisamente en aquella época, el joven Andrés Vesalio estaba terminando su formación como médico y comenzando a hacerse un nombre dentro de la profesión.

Vesalio nació en Bruselas el 31 de diciembre de 1514, en una familia que tenía ya tradición dentro de la medicina —su padre fue el farmacéutico real de Carlos V, el llamado emperador del nuevo Sacro Imperio Romano Germánico (en realidad, un príncipe alemán)—. Siguiendo la tradición familiar, Vesalio estudió primero en la Universidad de Lovaina, pero en 1533 se matriculó para estudiar medicina en París. En aquel momento, París era el centro del resurgimiento de Galeno, y Vesalio, además de recibir enseñanzas sobre las obras del maestro, adquirió también en aquella época una gran habilidad para practicar la disección. Su estancia en París terminó abruptamente en 1536 por culpa de la guerra entre Francia y el Sacro Imperio Romano Germánico (que, como suelen decir los historiadores, ni era imperio, ni era sacro, ni romano, aunque pasara a la historia

con este nombre), y Vesalio regresó a Lovaina, donde se licenció en medicina en 1537. Su entusiasmo por la disección y su interés por el cuerpo humano quedan demostrados en un hecho bien documentado que sucedió durante el otoño de 1536, cuando robó un cuerpo (o lo que quedaba de él) que pendía de una horca en algún lugar situado fuera de Lovaina, y se lo llevó a su casa para estudiarlo.

Para lo que se estilaba por aquel entonces, la Facultad de Medicina de Lovaina era conservadora y retrógrada (en comparación con la de París, claro), pero dado que la guerra continuaba, Vesalio no podía regresar a Francia. En vez de esto, poco después de obtener la licenciatura, Vesalio se fue a Italia, donde se matriculó como estudiante de posgrado en la Universidad de Padua a finales de 1537. Sin embargo, esto parece haber sido una mera formalidad, ya que después de pasar por un examen inicial que superó con un éxito rotundo, se le concedió casi inmediatamente el título de doctor en medicina y fue nombrado profesor de la Facultad de Medicina de Padua. Vesalio fue un profesor popular y de éxito dentro de la «tradición» galénica, que era aún muy reciente. No obstante, a diferencia de Galeno, fue también un disector de seres humanos dotado de gran capacidad y entusiasmo, y al contrario de lo que había sucedido con sus actividades como ladrón de tumbas en Lovaina, estas investigaciones recibieron el apoyo de las autoridades de Padua, sobre todo del juez Marcantonio Contarini, que no sólo le suministró cadáveres de criminales ejecutados, sino que a veces retrasó el momento de las ejecuciones para adaptarse al calendario de Vesalio y a sus necesidades de cuerpos frescos. Este trabajo de disección no tardó en convencer a Vesalio de que Galeno había tenido poca o ninguna experiencia con la disección de cuerpos humanos y le animó a preparar su propio libro sobre anatomía humana.

6. Un folio del *Tabulae Anatomica Sex de Vesalio*, 1538.

Los planteamientos de Vesalio sobre este tema fueron en su totalidad, si no exactamente revolucionarios, sí un gran paso hacia adelante con respecto a lo que se había hecho anteriormente. En la Edad Media, las disecciones, en los pocos casos en que se hacían, eran realizadas a efectos de demostración por los cirujanos, que estaban considerados como una categoría inferior en la práctica de la medicina, mientras que el profesor erudito daba clases magistrales sobre el tema, manteniéndose a una distancia prudente y sin ensuciarse las manos. Vesalio realizaba él mismo las disecciones mientras explicaba a los estu-

diantes el significado de lo que se iba descubriendo, con lo cual confirió una categoría superior a la cirugía, primero en Padua y luego gradualmente en otros lugares a medida que esta práctica se extendía. También contrató a unos dibujantes excelentes para que le prepararan los grandes diagramas que utilizaba en sus clases. Seis de estos dibujos se publicaron en 1538 en una recopilación titulada *Tabulae Anatomica Sex* después de que uno de los diagramas de demostración fuera robado y plagiado. Tres de los seis dibujos eran del propio Vesalio, mientras que los otros tres habían sido realizados por John Stephen de Kalkar, un renombrado discípulo de Ticiano, lo cual puede darnos una idea de su gran calidad. No se sabe con seguridad, pero Stephen fue probablemente también el principal ilustrador de la obra maestra titulada *De Humani Corporis Fabrica* (conocida habitualmente como la *Fabrica*), publicada en 1543.

La importancia de la *Fabrica* no se debe sólo a la precisión de sus descripciones del cuerpo humano, sino también al hecho de que ponía el énfasis en la necesidad de que el profesor hiciera por sí mismo el trabajo sucio, en vez de delegar en un subordinado la parte más importante del asunto. Incidiendo aún más en la cuestión, subrayó la importancia de aceptar la prueba que se veía con los propios ojos en vez de creer implícitamente las palabras transmitidas por generaciones anteriores —los antiguos no eran infalibles—. Pasó mucho tiempo hasta que el estudio de la anatomía humana se convirtió en una tarea del todo respetable —la cuestión de despedazar personas siguió produciendo una intranquilidad crónica—. Pero el proceso de establecer, en el sentido más amplio, que el estudio adecuado del ser humano se realiza en el propio ser humano comenzó con la obra de Vesalio y la publicación de la *Fabrica*. Éste era un libro destinado a los expertos en medicina, pero Vesalio quería llegar también a un público más amplio. Junto a la Fabrica, realizó asimismo un resumen para los estudiantes, el *Epítome,* que se

publicó también en 1543. Sin embargo, después de haber dejado este testimonio en el campo de la medicina y de haber establecido un precedente para el estudio científico en general, Vesalio abandonó repentinamente su carrera de académico, a pesar de que aún no había cumplido los 30 años de edad.

Había pasado ya un tiempo considerablemente largo fuera de Padua en 1542 y 1543 (la mayor parte de este tiempo había estado en Basilea) preparando la publicación de sus dos libros, y aunque parece que se trató de una ausencia autorizada oficialmente, nunca regresó a su plaza de profesor. No está del todo claro si la causa fue que estaba harto de las críticas que su trabajo había suscitado entre los galenistas no reconstituidos, o que deseaba practicar la medicina en vez de enseñarla (o una combinación de ambos factores), pero el hecho es que, provisto de copias de sus dos libros, Vesalio se presentó ante Carlos V y fue nombrado médico de la Corte —un cargo de prestigio cuyo mayor inconveniente era que no estaba prevista la dimisión del médico mientras viviera el emperador—. Pero no es probable que Vesalio lamentara su decisión, ya que cuando Carlos V le permitió abandonar el cargo en 1556 (poco antes de que el emperador abdicara) y le concedió una pensión, Vesalio se apresuró a aceptar un cargo similar con Felipe II, el hijo de Carlos V (el mismo Felipe que posteriormente envió su armada a atacar Inglaterra). Con el tiempo se vio que la decisión de Vesalio no había sido acertada. Los médicos españoles carecían de la competencia a la que Vesalio estaba acostumbrado y la hostilidad que sintieron inicialmente contra él por ser extranjero se exacerbó cuando creció el movimiento independentista en los Países Bajos, que estaban gobernados entonces por España. En 1564, Vesalio obtuvo un permiso de Felipe II para peregrinar a Jerusalén, lo que parece haber sido una excusa para detenerse en Italia e iniciar negociaciones con la Universidad de Padua, con la idea de retomar allí su antiguo puesto de trabajo. Pero,

en el viaje de regreso desde Tierra Santa, el barco en el que iba Vesalio se encontró con fuertes tormentas que le hicieron retrasarse lo suficiente como para que se agotaran las reservas que llevaba a bordo, al mismo tiempo que los pasajeros padecían fuertes crisis de mareo. Vesalio enfermó (no sabemos exactamente de qué), y en la isla griega de Zante, donde el barco había encallado, murió en octubre de 1564 a los cincuenta años de edad. Aunque a partir de 1543 Vesalio realizó escasas contribuciones directas a los avances de la ciencia, tuvo sin embargo una gran influencia a través de sus sucesores de Padua, llegando esta influencia a impulsar uno de los mayores logros del siglo XVII: el descubrimiento de la circulación de la sangre realizado por William Harvey.

En cierto modo, la historia de Harvey comienza en el próximo capítulo, pero la línea que va desde Vesalio hasta Harvey es tan clara que resulta más lógico recorrerla ahora hasta su conclusión última que volver a la evolución de la astronomía en el siglo XVI. Del mismo modo que este libro no trata de tecnología, tampoco pretendo profundizar en las implicaciones estrictamente médicas de la investigación del cuerpo humano. Pero la contribución especial de Harvey no fue lo que descubrió (aunque ya es de por sí bastan te impresionante), sino el modo en que demostró que su descubrimiento era real.

Fallopio y Fabricius

La línea que va directamente desde Vesalio hasta Harvey incluye a otros dos científicos. El primero es Gabriele Fallopio (conocido también como Gabriel Fallopius), que fue discípulo de Vesalio en Padua, llegó a ser profesor de anatomía en Pisa en 1548 y regresó a Padua en 1551 para hacerse cargo del puesto, también de profesor de anatomía, que había ocupado el propio Vesalio en otros tiempos. Aunque falleció en 1562 a la tempra-

na edad de 39 años, destacó en biología humana por dos contribuciones diferentes. En primer lugar, llevó a cabo sus propias investigaciones sobre los sistemas del cuerpo humano, siguiendo en gran medida el estilo de Vesalio, lo cual le llevó a descubrir, entre otras cosas, las «trompas de Fallopio», que todavía se conocen por este nombre. Fallopio descubrió unos conductos que unían el útero a los ovarios y que se acampanaban al final como una «trompeta» —como una trompa o una tuba—. Esta descripción tan precisa se tradujo posteriormente de forma equivocada como «tubo»,[*] y la medicina moderna parece haberse quedado definitivamente con una versión imprecisa del término[2]. Sin embargo, quizá la contribución más importante de Fallopio a la anatomía fue su papel como maestro de Girolamo Fabrizio, que llegó a ser conocido como Hieronymous Fabricius ab Acquapendente, y fue el sucesor de Fallopio en la cátedra de Padua a la muerte de este último.

Fabricius nació el 20 de mayo de 1537 en la ciudad de Acquapendente y se graduó en Padua en 1559. Trabajó como cirujano y dio clases particulares de anatomía hasta que en 1565 recibió el nombramiento para la cátedra de Padua —que había estado vacante durante tres años después de la muerte de Fallopio, de modo que Fabricius fue el sucesor directo de éste, a pesar del intervalo en que nadie la ocupó—. Fue precisamente durante este intervalo cuando Vesalio inició negociaciones para ocupar el puesto y, si no hubiera sido por su desafortunado viaje a Jerusalén, probablemente habría conseguido la cátedra antes que Fabricius. Gran parte de los trabajos de Fabricius tuvieron como tema la embriología y el desarrollo del feto, que estudió en huevos de gallina, pero con la perspectiva que nos da nuestra visión retrospectiva podemos ver que su principal contribución a la ciencia fue realizar la primera descripción precisa y detallada de las válvulas venosas. Estas válvulas ya se conocían, pero Fabricius las investigó minuciosamente y las descri-

bió con todo detalle, primero en demostraciones realizadas públicamente en 1579 y posteriormente en un libro con ilustraciones muy precisas publicado en 1603. Sin embargo, su habilidad como anatomista para describir las válvulas no se correspondió con ninguna idea notable sobre la función de éstas —pensó que su función era frenar el flujo sanguíneo que partía del hígado para que pudiera ser absorbido por los tejidos del cuerpo—. Fabricius se retiró en 1613 por problemas de salud y falleció en 1619. No obstante, para entonces, William Harvey, que fue discípulo de Fabricius en Padua durante algún tiempo entre finales de la década de 1590 y 1602, estaba ya en camino de encontrar una explicación para el funcionamiento real del sistema circulatorio.

William Harvey y la circulación de la sangre

Antes de los descubrimientos que hizo Harvey, los conocimientos que se habían ido transmitiendo (y que se remontaban hasta Galeno y épocas aún anteriores) decían que la sangre se fabricaba en el hígado y era transportada a través de las venas por todo el cuerpo para llevar alimento a los tejidos y se consumía totalmente en este proceso, de tal forma que se tenía que producir sangre nueva constantemente. Se consideraba que la función del sistema arterial era transportar el «espíritu vital» desde los pulmones y repartirlo por todo el cuerpo (lo que en realidad no estaba muy lejos de la verdad, dado que el oxígeno no se descubriría hasta 1774). En 1553, el médico y teólogo español Michael Servetus (nacido en 1511 y bautizado como Miguel Servet) explicaba en su libro *Christianismi Restitutio* la circulación «menor» de la sangre (que fue el nombre con que se conoció después este hallazgo) en la que la sangre viaja desde el lado derecho del corazón hasta el lado izquierdo del mismo, pasando por los pulmones y no a través de unos diminutos ori-

ficios de una pared que dividía el corazón, como había dicho Galeno. Servet llegó a esta conclusión en gran parte por razones teológicas, no mediante la disección, y las presentó como una digresión dentro de un tratado de teología. Por desgracia par a Servet, los puntos de vista teológicos que expresó en dicho tratado (y en otros escritos anteriores) eran contrarios al dogma de la Trinidad. Al igual que Giordano Bruno, Servet no creía que Jesucristo fuera la encarnación de Dios y sufrió el mismo destino que Bruno a causa de sus creencias, pero a manos de otros. Jean Calvin (o Juan Calvino) estaba por aquel entonces en el apogeo de su actividad reformadora y Servet le escribió, a Ginebra, hablándole de sus teorías. Cuando Calvino dejó de contestar a sus cartas, Servet, que residía en Viena, continuó enviándole un raudal continuo de misivas cada vez más vituperantes. Fue una gran equivocación. Cuando el libro se publicó, Calvino se puso en contacto con las autoridades de Viena y consiguió que encarcelaran al hereje. Servet escapó y se dirigió a Italia, pero cometió una equivocación más al tomar el camino directo que pasaba por Ginebra (es difícil no pensar que podía haber tenido más sentido común), donde fue reconocido, capturado y quemado en la hoguera por los calvinistas el 27 de octubre de 1553. También sus libros fueron quemados y sólo se salvaron tres copias de *Christianismi Restitutio*. Servet no ejerció ninguna influencia sobre la ciencia de su época y Harvey no llegó a saber nada sobre su obra, pero la historia de cómo encontró Servet la muerte es un dato indispensable para una visión retrospectiva de lo que fue el mundo del siglo XVI.

Desde Galeno, siempre se había pensado que las venas y las arterias transportaban sustancias diferentes, es decir, dos tipos de sangre. Según los conocimientos actuales, el corazón humano (como los corazones de otros mamíferos y aves) está formado realmente por dos corazones en uno solo: la mitad de la derecha bombea sangre sin oxígeno hacia los pulmones, donde la

sangre toma oxígeno y regresa a la mitad izquierda del corazón, que a su vez bombea la sangre oxigenada a todo el cuerpo. Uno de los descubrimientos clave de Harvey fue que las válvulas venosas, descritas con tanta precisión por su maestro Fabricius, son sistemas de dirección única, que hacen que la sangre fluya sólo hacia el corazón, de donde tiene que salir como sangre arterial, para ser bombeada desde el corazón y viajar a través de diminutos capilares que unen los sistemas arterial y venoso, entrando así la sangre de nuevo en las venas. Pero todo esto quedaba todavía lejos en el futuro cuando Harvey comenzó su carrera de medicina.

William Harvey había nacido en Folkestone, Kent, el 1 de abril de 1578. Fue el mayor de los siete hijos de un pequeño terrateniente y granjero. Estudió en la King's School de Canterbury y en el Caius College de Cambridge, donde obtuvo su licenciatura en humanidades y comenzó probablemente a estudiar medicina. Sin embargo, pronto se trasladó a Padua, donde fue discípulo de Fabricius y se doctoró en medicina en 1602. Cuando era estudiante en Padua, Harvey tuvo que oír hablar de Galileo, que enseñaba allí por aquel entonces, pero, por lo que sabemos, nunca llegaron a conocerse el uno al otro. Tras volver a Inglaterra en 1602, Harvey contrajo matrimonio en 1604 con Elizabeth Browne, hija de Lancelot Browne, que era el médico de Isabel I. Dado que se movía en los círculos reales, Harvey desarrolló una brillante carrera como médico; en 1609 fue nombrado médico del hospital de San Bartolomé de Londres, después de haber sido elegido miembro del consejo de gobierno del College of Physicians (Colegio de Médicos) en 1607, y en 1618 (dos años después de la muerte de William Shakespeare) llegó a ser uno de los médicos de Jacobo I (que había sucedido a Isabel I en 1603). En 1630, Harvey recibió un nombramiento aún más prestigioso como médico personal del hijo de Jacobo I, Carlos I, que accedió al trono en 1625. Como recom-

pensa por estos servicios, en 1645, a los 67 años de edad, fue nombrado director del Merton College de Oxford. Sin embargo, en 1646, cuando la guerra civil asolaba Inglaterra, Oxford cayó dentro de la esfera de influencia de las fuerzas parlamentarias, por lo que Harvey dimitió de su cargo (aunque técnicamente conservó su puesto de médico real hasta que Carlos I fue decapitado en 1649), y llevó una vida tranquila hasta su muerte el 3 de junio de 1657. En 1654, después de haber sido elegido presidente del Colegio de Médicos, tuvo que declinar tal honor a causa de su avanzada edad y su mala salud.

La gran obra por la que Harvey es famoso actualmente fue en realidad un trabajo que hizo en su tiempo libre, siendo ésta una de las razones por las que tardó en publicar los resultados, que aparecieron en 1628 en un libro crucial titulado *De Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus* (*Sobre el movimiento del corazón y de la sangre en los animales*). Otra razón para la tardanza fue que, a pesar de haber transcurrido cincuenta años desde la publicación de la Fabrica, en algunos círculos seguía existiendo una fuerte oposición a los intentos de revisar las enseñanzas de Galeno. Harvey sabía que tenía que presentar el caso con una claridad meridiana con el fin de demostrar que la circulación de la sangre era un hecho real, y es precisamente el modo en que presentó el caso lo que le convierte en una figura clave de la historia de la ciencia, ya que fijó el camino que deberían seguir en el futuro los científicos, no sólo en medicina, sino en todas las disciplinas.

Incluso el modo en que Harvey se interesó por el problema muestra cómo habían cambiado las cosas desde los días en que los filósofos construían en sueños hipótesis abstractas sobre el funcionamiento del mundo natural, basándose más en principios de perfección que en la observación y la experiencia. Lo que Harvey hizo fue medir la capacidad del corazón, órgano al que describió como un guante inflado, y calculó la cantidad de

sangre que bombeaba a las arterias por minuto. Sus estimaciones fueron algo imprecisas, pero lo suficientemente buenas como para conseguir lo que buscaba. Pasando las medidas a las unidades que se utilizan actualmente, Harvey calculó que el corazón humano bombea por término medio 60 centímetros cúbicos de sangre en cada latido, lo que totaliza casi 260 litros por hora —una cantidad de sangre equivalente al triple del peso de un hombre normal—. Estaba claro que el cuerpo no podía fabricar tanta cantidad de sangre y que tenía que ser mucho menor la cantidad que circula continuamente por las venas y las arterias. En consecuencia, Harvey construyó su teoría utilizando una combinación de experimentos y observaciones. Aunque no podía ver las diminutas conexiones existentes entre las venas y las arterias, demostró que debían existir atando una cuerda (o ligadura) alrededor de un brazo. Las arterias se encuentran a mayor profundidad que las venas bajo la superficie del brazo, por lo que, aflojando ligeramente la ligadura, dejaba que la sangre fluyera a través de las arterias, mientras la cuerda seguía estando lo suficientemente prieta para evitar que la sangre retrocediera por las venas, por lo que éstas se hinchaban bajo la ligadura. Harvey indicó que la rapidez con que los venenos podían repartirse por todo el cuerpo encajaba con la idea de que la sangre circula continuamente. Además, llamó la atención sobre el hecho de que las arterias que se encuentran cerca del corazón son más gruesas que las que están lejos de este órgano, precisamente tal como debe ser para resistir la mayor presión que se produce cerca del corazón debido a la fuerte expulsión de sangre en la acción de bombeo.

Sin embargo, no hemos de quedarnos con la idea de que fuera Harvey quien inventó el método científico. En realidad, Harvey fue más un hombre del Renacimiento que un científico moderno, y su pensamiento se apoyaba todavía en la idea de fuerzas vitales, un concepto abstracto de perfección y de espíri-

tus que mantenían el cuerpo vivo. Según sus propias palabras (según la traducción de su libro al inglés realizada en 1653):

> Con toda probabilidad, lo que sucede en el cuerpo es que todas sus partes son alimentadas, cuidadas y aceleradas mediante la sangre, que es caliente, perfecta, vaporosa, llena de espíritu y, por decirlo así, nutritiva: en dichas partes del cuerpo se refrigera, se coagula y, al quedarse estéril, vuelve desde allí al corazón, como si éste fuera la fuente o la morada del cuerpo, con el fin de recuperar su perfección, y allí, de nuevo, se funde mediante el calor natural, adquiriendo potencia y vehemencia, y desde allí se difunde otra vez por todo el cuerpo, cargada de espíritus, como con un bálsamo, y todas estas cosas dependen de la pulsación motriz del corazón: por lo tanto, el corazón es el principio de la vida, el Sol del microcosmos, lo mismo que en otra proporción el Sol merece ser llamado el corazón del mundo, por cuya virtud y pulsación la sangre se mueve de manera perfecta, es convertida en vegetal y queda protegida de corromperse y supurar: y este dios doméstico y familiar cumple sus tareas para todo el cuerpo, alimentando, cuidando y haciendo crecer, siendo el fundamento de la vida y el autor de todo.

Esto queda muy lejos de la idea común según la cual Harvey fue el primero que describió el corazón «únicamente» como una bomba que mantiene a la sangre en circulación por todo el cuerpo (en realidad, fue René Descartes quien dio este paso, sugiriendo en su *Discurso del método*, publicado en 1637, que el corazón es meramente una bomba mecánica). Tampoco es toda la verdad decir simplemente, como dicen muchos libros, que Harvey consideró el corazón como la fuente de calor para la sangre. Sus puntos de vista fueron más místicos que todo eso. Sin embargo, la obra de Harvey constituyó un gran paso hacia adelante y en todos aquellos escritos suyos que le han sobrevivido (por desgracia, muchas de sus publicaciones se perdieron cuando las tropas parlamentarias saquearon su residencia de Londres en 1642) se repite una y otra vez el énfasis en la importancia del conocimiento derivado de la observación y la experiencia personales. Señaló específicamente que nunca deberíamos negar la existencia de unos fenómenos sólo porque no sepamos cuáles son sus causas. Por consiguiente, debemos ser condescendientes con sus explicaciones «incorrectas» sobre la circulación de la sangre y centrarnos en lo que realmente con-

siguió: el descubrimiento de que la sangre de hecho circula. Aunque la teoría de Harvey no fue aceptada universalmente al principio, sin embargo, a los pocos años de su muerte, gracias al invento del microscopio en la década de 1650, la única laguna que había en su argumentación quedó resuelta con el descubrimiento de las pequeñas conexiones existentes entre las arterias y las venas —un claro ejemplo de la relación entre el progreso científico y el progreso tecnológico.

Por lo que respecta a la historia de la ciencia, si Harvey fue uno de los últimos hombres del Renacimiento, esto no significa que podamos trazar una clara línea divisoria en el calendario y decir que la auténtica ciencia comenzó después de conocerse su obra, a pesar de la coincidencia temporal de su fallecimiento con la aparición del microscopio. Como ponen de manifiesto las coincidencias existentes entre sus publicaciones y las de Descartes, la historia no se desarrolla en secciones claramente diferenciadas, y la persona que encaja mejor con la categoría de primer científico de la historia estaba ya trabajando incluso antes de que Harvey empezara sus estudios en Padua. Ahora es el momento de regresar al siglo XVI y retomar el hilo de los avances de la astronomía y de la mecánica que se produjeron a partir de la obra de Copérnico.

Capítulo 2

LOS ÚLTIMOS MÍSTICOS

El movimiento de los planetas

Quien más merece el título de «primer científico» de la historia es Galileo Galilei, que no sólo aplicó en su obra lo que es en esencia el método científico moderno, sino que comprendió plenamente lo que estaba haciendo y estableció con claridad las reglas básicas para que otros las siguieran. Además, la obra que llevó a cabo siguiendo estas reglas básicas tuvo una importancia inmensa. A finales del siglo XVI, otros científicos trabajaron ateniéndose a estos criterios —pero los que dedicaron su vida a lo que actualmente llamamos ciencia a menudo estaban estancados todavía por culpa de una mentalidad medieval que no sabía apreciar la importancia de su obra o de una parte de ella, mientras que los que veían más claramente la importancia, por decirlo más adecuadamente, filosófica del nuevo modo de contemplar la realidad eran generalmente científicos a tiempo parcial y tenían poca influencia sobre el modo en que otros planteaban la investigación—. Galileo fue el primero que incluyó todo en el mismo paquete. Sin embargo, como todos los científicos, Galileo construyó sus teorías sobre los conocimientos que existían ya con anterioridad, y en este caso el vínculo directo se estableció desde Copérnico, el hombre que (partiendo a su vez de la obra de predecesores tales como Peuerbach y Regiomontano) comenzó a transformar la astronomía en el Renacimiento, hasta Galileo, pasando por Tycho Brahe y Johannes

Kepler (y, como veremos, pasando a continuación de Kepler y Galileo a Isaac Newton). Tycho Brahe constituye también un ejemplo especialmente claro del modo en que una obra científica de extraordinaria importancia podía, aún en aquella época, mezclarse con interpretaciones anticuadas y místicas del significado de la propia obra. En sentido estricto, Brahe y Kepler no fueron los últimos místicos —pero, al menos por lo que respecta a la astronomía—, fueron ciertamente unos personajes de transición entre el misticismo de los antiguos y la ciencia de Galileo y sus sucesores.

Tycho Brahe

Tycho Brahe nació en Knudstrup, en el extremo sur de la península de Escandinavia, el 14 de diciembre de 1546, un lugar que actualmente pertenece a Suecia, pero entonces era parte de Dinamarca. Fue bautizado con el nombre de Tyge (actuó como un personaje de transición incluso por el hecho de que latinizó su nombre de pila pero no su apellido).

Procedía de una familia aristocrática. Su padre, Otto, estuvo al servicio del rey como consejero privado, fue sucesivamente lugarteniente de varios condados y terminó su carrera siendo gobernador del castillo de Helsingborg (situado en frente de Elsinore, un lugar que posteriormente William Shakespeare haría famoso en *Hamlet*, drama representado por primera vez en 1600). Tycho fue el mayor de los hijos varones, nacido después de una niña, y llegó al mundo, como se suele decir, con un pan debajo del brazo, aunque casi inmediatamente su vida dio un giro que podría parecer teatral. Otto tenía un hermano llamado Jorgen, almirante de la armada danesa, que estaba casado pero no tenía hijos. Los dos hermanos habían acordado que, cuando Otto tuviera un niño, se lo entregaría a Jorgen para que éste lo educara como si fuese su propio hijo. Cuando Tycho nació, Jor-

gen recordó a Otto su promesa, pero recibió una respuesta negativa. Puede ser que esto estuviera relacionado con el hecho de que Tycho tuvo un hermano gemelo que nació muerto y es posible que sus padres temieran que la esposa de Otto, Beate, no pudiera tener más hijos. Jorgen esperó el momento oportuno y éste se presentó cuando, transcurrido poco más de un año, nació otro niño, es decir, uno de los hermanos menores de Tycho; entonces, Jorgen secuestró al pequeño Tycho y se lo llevó a su casa de Tostrup.

Dado que tenían otro niño saludable que criar (Otto y Beate tuvieron en total cinco niños y cinco niñas, todos saludables), la familia aceptó la situación como un hecho consumado y Tycho fue educado por su tío paterno. Siendo niño, recibió una sólida formación en latín y, posteriormente, fue enviado a la Universidad de Copenhague en abril de 1559, cuando aún no había cumplido los 13 años de edad —que en aquellos tiempos no era una edad excesivamente temprana para que el hijo de un aristócrata comenzara una educación cuyo objetivo era capacitarle para desempeñar un alto cargo dentro del Estado o de la Iglesia.

Los planes de Jorgen para que Tycho siguiera una carrera al servicio del rey en el campo de la política empezaron a hacerse pedazos casi desde el principio, porque el 21 de agosto de 1560 hubo un eclipse de Sol. Aunque en Portugal el eclipse fue total, en Copenhague sólo hubo un eclipse parcial. Pero lo que captó la imaginación de Tycho Brahe a sus 13 años de edad no fue la nada espectacular aparición del eclipse, sino el hecho de que el suceso había sido predicho mucho antes en las tablas de observaciones del modo en que la Luna parecía moverse entre los astros —las tablas se remontaban a tiempos antiguos, pero habían sido modificadas a partir de observaciones posteriores, especialmente por astrónomos árabes—. A Tycho Brahe le pareció «algo divino que los hombres pudieran conocer los movimien-

tos de los astros de una manera tan precisa que fueran capaces de predecir sus ubicaciones y sus posiciones relativas con una gran antelación».[1]

Durante la mayor parte del resto del tiempo que pasó en Copenhague (más de dieciocho meses), Tycho Brahe se dedicó a estudiar astronomía y matemáticas, mientras su tío adoptaba una actitud aparentemente indulgente considerando que se trataría de una fase pasajera dentro del proceso de maduración del niño. Entre otras cosas, Tycho Brahe compró una copia de la edición en latín de las obras de Tolomeo e hizo muchas anotaciones en ella (incluida una en la portada, donde recordaba que había adquirido el ejemplar el último día de noviembre de 1560 por dos táleros).

En febrero de 1562, Tycho Brahe abandonó Dinamarca para completar su educación en el extranjero, como parte del proceso habitual que habría de convertirle en un adulto apto para asumir su posición en la sociedad. Fue a la Universidad de Leipzig, donde llegó el 24 de marzo, acompañado por un joven respetable llamado Anders Vedel, al que Jorgen había nombrado su tutor, aunque sólo era cuatro años mayor que Tycho, para que actuara como acompañante y, por supuesto, mantuviera al joven alejado del mal camino. Vedel tuvo un éxito parcial. Se suponía que Tycho iba a estudiar leyes en Leipzig y realizó esta tarea con una diligencia razonable. Sin embargo, su gran afición académica seguía siendo la astronomía. Todo el dinero que le sobraba lo gastaba en instrumentos y libros de astronomía, y permanecía despierto hasta altas horas realizando sus propias observaciones de los cielos (en el momento adecuado, es decir, mientras Vedel dormía). Aunque era Vedel quien tenía la bolsa y Tycho tenía que darle cuentas de todos sus gastos, poco era lo que el tutor podía hacer para frenar el entusiasmo del joven, y en consecuencia la habilidad de Tycho Brahe como

observador y sus conocimientos de astronomía aumentaron más rápidamente que sus conocimientos de leyes.

La medición de las posiciones de las estrellas

Sin embargo, cuando se hizo más experto en astronomía, Tycho Brahe se dio cuenta de que la precisión con la que los hombres parecían «conocer las posiciones de las estrellas» era mucho menos impresionante de lo que le había parecido al principio. Por ejemplo, en agosto de 1563 se produjo una conjunción de Saturno y Júpiter —un raro fenómeno astronómico en el que dos planetas están tan próximos entre sí en la bóveda celeste que parecen fundirse el uno con el otro—. Este suceso, que tuvo una gran importancia para los astrólogos,[2] se había pronosticado con anterioridad, dándole una amplia difusión, y se esperaba ansiosamente. Sin embargo, el fenómeno se produjo en realidad el 24 de agosto, a pesar de que toda una serie de tablas los predecían para un mes más tarde e incluso las tablas más precisas tenían un error de varios días. Nada más empezar su carrera como astrónomo, Tycho Brahe abordó la cuestión que sus inmediatos predecesores y sus contemporáneos parecían no haber querido tocar, ya fuera por pereza o por un respeto excesivo a los sabios de la Antigüedad: que una comprensión correcta del movimiento de los planetas y de su naturaleza sería imposible sin realizar una larga serie de esmeradas observaciones de sus movimientos con respecto a las estrellas fijas, llevando a cabo dichas observaciones y estudios con una precisión mayor que la que habían tenido los realizados con anterioridad. A los 16 años, Tycho Brahe tenía ya claro cuál era su misión en la vida. La única manera de confeccionar tablas correctas sobre el funcionamiento de los planetas, era realizar unas largas series de observaciones, en vez de limitarse a lo hecho por Copérnico, que consistía en realizar alguna que otra obser-

vación de vez en cuando y añadirla quizás a las observaciones de los antiguos.

Recordemos que los instrumentos que se utilizaban en aquellos tiempos para hacer observaciones, antes de la invención del telescopio astronómico, requerían una gran habilidad para su construcción y aún mayor pericia para su utilización (con los telescopios modernos y los ordenadores que llevan acoplados, sucede todo lo contrario). Una de las técnicas más sencillas utilizadas por Tycho Brahe en 1563 consistía en sostener un compás cerca del ojo, situando la punta de una de las patas del compás en una estrella y la otra en el planeta que interesara observar, por poner un ejemplo, digamos que fuera Júpiter. Utilizando el compás con esta separación para medir distancias marcadas sobre el papel, Tycho Brahe podía calcular la separación angular que había entre los dos objetos en el cielo justo en aquel momento[3]. Sin embargo, necesitaba una precisión mucho mayor que la que le podía proporcionar este método. Aunque los detalles relativos a los instrumentos que utilizaba no son cruciales para esta historia, merece la pena mencionar uno de ellos, llamado alidada o escuadra de agrimensor, que Tycho Brahe se había fabricado él mismo a principios de 1564. Se trataba de un tipo de instrumento utilizado normalmente para la navegación y la astronomía en aquellos tiempos, consistente en dos varillas o pínulas, formando una cruz, que se deslizaban en ángulos rectos la una con respecto a la otra, graduadas y subdivididas en intervalos, de tal forma que alineando las estrellas o los planetas con los extremos de las varillas cruzadas era posible leer en la escala su separación angular. Resultó que la alidada de Tycho Brahe no estaba marcada correctamente y no había dispuesto de dinero para que se la recalibrasen (Vedel seguía intentando realizar el cometido que le había encargado Jorgen Brahe e impedía a Tycho que invirtiera todo su tiempo y su dinero en la astronomía). Entonces, Tycho Brahe ideó para

este instrumento una tabla de correcciones en la que, después de realizar cualquier observación, podía leer la medida correcta correspondiente a la lectura incorrecta obtenida con su alidada. Este ejemplo sería imitado por otros astrónomos que durante siglos estuvieron intentando apañárselas con instrumentos imperfectos, hasta llegar incluso al caso del telescopio espacial Hubble, al que se le hizo el famoso «arreglo» consistente en utilizar un juego suplementario de espejos para corregir los defectos del espejo principal del telescopio.

Dado que Tycho Brahe era un aristócrata con un futuro (aparentemente) asegurado, no era necesario que cumpliera con la formalidad de obtener un título, y se marchó de Leipzig en mayo de 1565 (acompañado todavía por Vedel) porque había estallado la guerra entre Suecia y Dinamarca, y su tío opinaba que Tycho debía regresar a casa. El encuentro entre ambos fue breve. A finales del mes de mayo, Tycho Brahe estaba ya de vuelta en Copenhague, donde se encontró con que Jorgen también acababa de regresar de combatir en una batalla naval en el Báltico. Pero un par de semanas más tarde, cuando el rey Federico II y un destacamento en el que se encontraba también el almirante cruzaban el puente que unía el castillo de Copenhague con la ciudad, el rey cayó al agua. Jorgen fue uno de los que acudieron inmediatamente a rescatarlo y, aunque la salud del rey no se resintió prácticamente por los efectos de la inmersión, Jorgen Brahe contrajo un resfriado, surgieron complicaciones, y murió el 21 de junio. A pesar de que los miembros del resto de la familia (con excepción de uno de sus tíos maternos) desaprobaban el interés de Tycho Brahe por las estrellas y habrían preferido que siguiera una carrera más en consonancia con su posición social, resultó que Tycho había recibido una herencia de su tío y no podían hacer nada para atarlo corto (salvo que hubieran decidido secuestrarlo otra vez). A principios de 1566, poco después de haber cumplido diecinueve años,

Tycho salió de viaje, visitando primero la Universidad de Wittenberg y estableciéndose luego durante algún tiempo en Rostock, en cuya universidad realizó estudios y obtuvo finalmente un título.

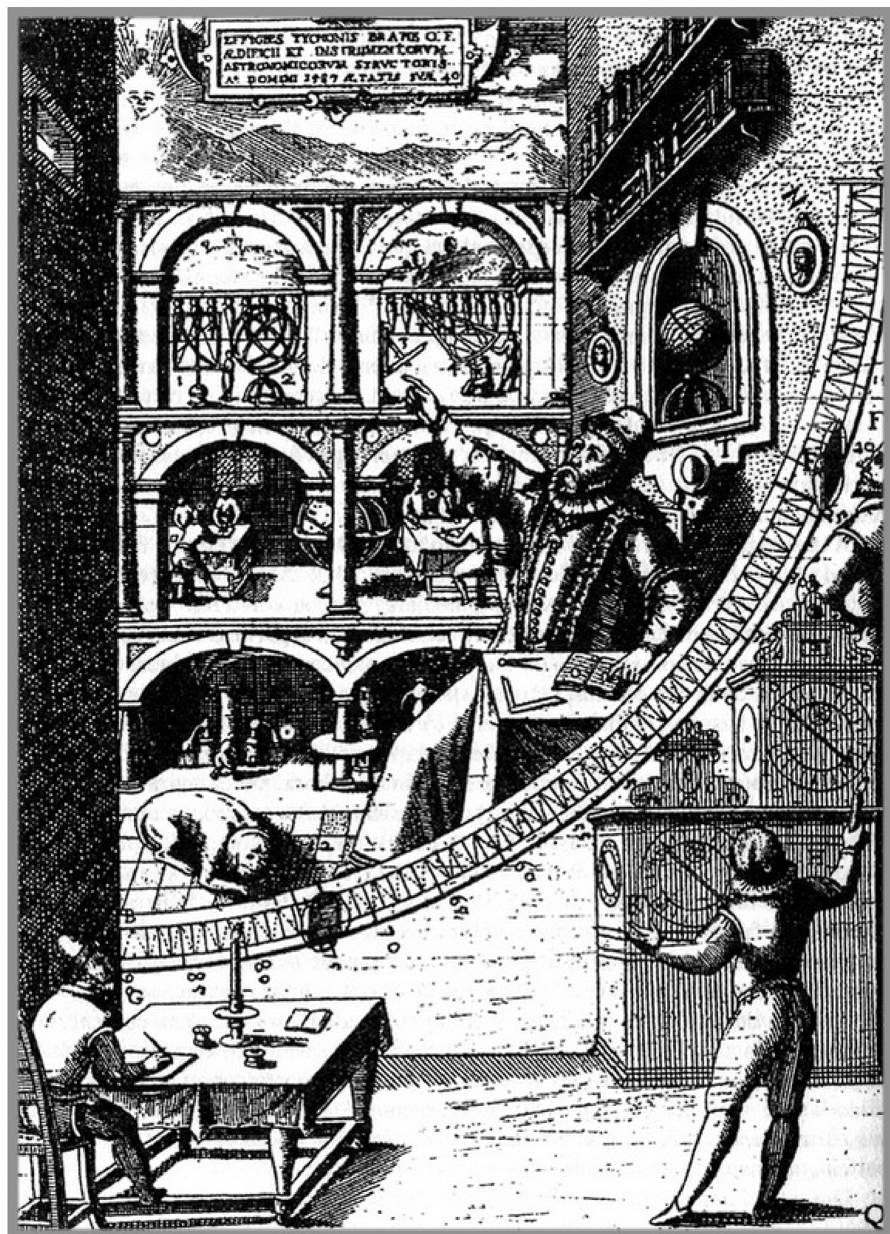
Estos estudios incluían astrología, química (más concretamente, alquimia) y medicina, por lo que, durante cierto tiempo, Tycho Brahe realizó pocas observaciones de las estrellas. La amplitud de sus intereses no es sorprendente, ya que se conocía tan poco sobre cada una de aquellas materias que no resultaba excesivamente complicado llegar a ser un especialista, mientras que, por otra parte, la influencia de la astrología hacía que se creyera, por ejemplo, que existía una estrecha relación entre lo que sucedía en los cielos y el funcionamiento del cuerpo humano.

Tycho Brahe, como otros hombres cultos de su tiempo, creía en la astrología y se aficionó a realizar horóscopos. Poco después de su llegada a Rostock, hubo un eclipse de Luna, concretamente el 28 de octubre de 1566. Basándose en un horóscopo que había confeccionado, Tycho Brahe declaró que este acontecimiento predecía la muerte del sultán otomano Solimán, conocido como *El Magnífico*. En realidad, no se trataba de una predicción excepcional, ya que Solimán tenía 80 años. Era famoso en toda la Europa cristiana y se había ganado el apodo de Magnífico en parte por haber conquistado Belgrado, Budapest, Rodas, Tabriz, Bagdad, Adén y Argel, habiendo sido además el responsable del ataque masivo llevado a cabo en 1565 contra Malta, que fue defendida con éxito por los caballeros de San Juan. El Imperio otomano llegó a su apogeo bajo el gobierno de Solimán y se convirtió en una seria amenaza para las zonas orientales de la Europa cristiana. Cuando llegó a Rostock la noticia de que Solimán realmente había fallecido, el prestigio de Tycho Brahe subió como la espuma —aunque su proeza perdió

brillo al saberse que el fallecimiento se había producido unas pocas semanas antes del eclipse.

Antes de que acabara aquel año, sucedió uno de los incidentes más famosos de la vida de Tycho Brahe. En un baile que se celebró el 10 de diciembre, Tycho Brahe riñó con otro aristócrata danés, Manderup Parsbjerg. Ambos volvieron a chocar en una fiesta de Navidad el 27 de diciembre (no sabemos con seguridad cuál fue el motivo, pero, según una de las versiones de esta historia, parece ser que Parsbjerg se burló de la predicción de Brahe con respecto a la muerte del sultán que ya estaba muerto) y la bronca llegó hasta tal punto que aquello sólo podía resolverse mediante un duelo. Volvieron a encontrarse a las 7 de la tarde del 29 de diciembre, cuando ya había oscurecido totalmente (resulta tan extraña la elección de la hora que se podría pensar en un encuentro accidental), y se pusieron a repartir mandobles a diestro y siniestro con sus espadas. Esta pelea no fue decisiva, pero Tycho Brahe recibió un golpe que le arrancó parte de la nariz. Durante el resto de su vida, para disimular esta desfiguración, utilizó una prótesis fabricada especialmente con oro y plata. Al contrario de lo que dicen los relatos más famosos, Tycho Brahe no perdió la punta de la nariz, sino un trozo de su parte superior; también solía llevar consigo una caja de ungüento y se le podía ver a menudo extendiéndoselo sobre la zona afectada para calmar la irritación.

Además del valor que pueda tener como curiosidad, esta anécdota es importante porque retrata a Tycho Brahe, que en aquel momento acababa de cumplir ya los veinte años, como un individuo algo provocador, arrogantemente consciente de sus habilidades y no siempre cauto en su comportamiento. Estos rasgos saldrían a la superficie en momentos posteriores a lo largo de su vida, para ocasionarle problemas más serios que una nariz estropeada.



7. Gran cuadrante de Tycho Brahe, 1569.

Durante el tiempo que pasó en Rostock, Tycho Brahe hizo varias visitas a su país de origen. Aunque nunca consiguió convencer a su familia de que estaba haciendo lo debido trabajando en lo que más le interesaba, es decir, en cosas como la astronomía; en otros ambientes no pasó desapercibido su nivel de erudición, que era cada vez más alto. El 14 de mayo de 1568, el rey, que seguía siendo Federico II, hizo a Tycho Brahe la promesa formal de concederle la primera canonjía que quedara vacante en la catedral de Roskilde, en Seeland. Aunque hacía más de treinta años que se había llevado a cabo la Reforma (se remontaba a 1536) y Dinamarca era un firme bastión protestante, los ingresos que antiguamente se habían destinado a los canónigos de la catedral se invertían entonces en subvencionar a los estudiosos y eruditos. Se les llamaba todavía canónigos y seguían viviendo en una comunidad vinculada a la catedral, pero no tenían encomendadas tareas religiosas y los cargos eran siempre por designación real. La oferta del rey Federico reflejaba ciertamente el potencial de Tycho Brahe como «erudito», pero, aunque la promesa parezca generosa en el caso de un hombre tan joven, hay que recordar también que el tío de Tycho Brahe había muerto, por cierto literalmente, al servicio del rey.

Después de finalizar sus estudios en Rostock y con el futuro asegurado por la promesa de una canonjía, a mediados de 1568 Tycho Brahe reanudó sus viajes. Visitó Wittenberg una vez más, y luego fue a Basilea, antes de instalarse durante una temporada en Augsburgo, a principios del año 1569, y comenzar allí a realizar una serie de observaciones. Para ayudarse en este trabajo, se había hecho construir una versión gigantesca de un instrumento llamado cuadrante. Este cuadrante tenía un radio de aproximadamente 6 metros, lo suficientemente grande como para su borde circular pudiera tener una graduación en minutos de ángulo, de tal forma que se pudieran realizar observaciones precisas. Estuvo colocado sobre una colina en el jardín

de unos de los amigos de Tycho, y permaneció allí durante cinco años, antes de que una tormenta lo destruyera en diciembre de 1574. Con anterioridad a esta fecha, en 1570, al recibir la noticia de que su padre estaba gravemente enfermo, Tycho Brahe se marchó de Augsburgo para regresar por un tiempo a Dinamarca. Sin embargo, esta situación no consiguió distraerle de su trabajo, que era la obra de su vida, y hacia finales de diciembre de aquel año Tycho Brahe estaba haciendo observaciones desde el castillo de Helsingborg.

Otto Brahe falleció el 9 de mayo de 1571, cuando tenía 58 años de edad, y dejó como herencia conjunta a sus dos hijos mayores, Tycho y Steen, su propiedad más importante, que era la de Knudstrup. Tycho Brahe fue a vivir con el hermano de su madre, que también se llamaba Steen, y que era la única persona de la familia que le había animado a dedicarse a la astronomía, y también el primero, en palabras del propio Tycho, que introdujo en Dinamarca a gran escala la fabricación de papel y las manufacturas de vidrio. Hasta finales de 1572, quizá bajo la influencia del anciano Steen, Tycho Brahe se dedicó principalmente a realizar experimentos químicos, aunque nunca abandonó su interés por la astronomía. Sin embargo, en la noche del 11 de noviembre de 1572 su vida iba a experimentar de nuevo un cambio, y esta vez se debía a uno de los acontecimientos más dramáticos que puede ofrecer el universo.

La supernova de Tycho Brahe

Aquella noche Tycho Brahe volvía a su casa desde el laboratorio y por el camino iba contemplando el panorama de las estrellas, cuando se dio cuenta de que algo extraño estaba sucediendo en la constelación de Casiopea —la constelación en forma de W que constituye una de las características distintivas del cielo en el hemisferio norte—. Había una estrella más en la

constelación, y no sólo eso, sino que su brillo era especial. Para darnos cuenta del impacto que esto podía producir en Tycho Brahe y sus contemporáneos, recordemos que en aquella época se pensaba que las estrellas eran unas luces fijas, eternas e invariables pegadas a una esfera de cristal. Era parte del concepto de perfección celeste la idea de que las constelaciones habían sido y serían exactamente iguales durante toda la eternidad. Si se trataba realmente de una estrella nueva, el fenómeno echaría por tierra aquella idea de perfección y, si se aceptaba que los cielos eran imperfectos, ¿quién podría saber lo que vendría a continuación?

Sin embargo, una sola observación no probaba que lo que Tycho Brahe había visto fuera una nueva estrella. Podía ser un objeto de menor importancia, por ejemplo, un cometa. Por aquel tiempo, se creía que los cometas eran fenómenos atmosféricos que se producían a una pequeña distancia de la superficie de la Tierra, menor incluso que la distancia a la que se encuentra la Lima (aunque, según se decía entonces, la atmósfera llegaba por lo menos hasta la Luna). El modo de averiguar qué estaba pasando era medir la posición del objeto con respecto a las estrellas contiguas a él en la constelación de Casiopea y ver si cambiaba de posición, como haría un cometa o un meteoro, o si por el contrario estaba siempre en el mismo lugar, como sucedería en el caso de ser una estrella. Afortunadamente, Tycho Brahe acababa de terminar la construcción de otro sextante muy grande y, durante las noches siguientes, en los momentos en que las nubes se retiraban y el cielo quedaba claro, concentró su atención en la nueva estrella. Esta estuvo visible durante dieciocho meses y en todo aquel tiempo no se movió nunca con respecto a las demás estrellas. Por lo tanto, era una nueva estrella, que al principio era tan brillante (tanto como Venus) que podía verse durante el día, aunque fue perdiendo su brillo gradualmente a partir de diciembre de 1572. Por supuesto, hubo

otras muchas personas que vieron también la estrella y en 1573 circularon muchos relatos llenos de fantasía en los que se intentaba explicar su significado. Tycho Brahe ya había escrito su propio informe sobre este fenómeno. Aunque al principio fue reacio a publicarlo (posiblemente porque le preocupaba cómo podrían reaccionar otras personas al quedar hecha pedazos la idea de la perfección de los cielos; quizá también porque la estrella aún era visible, con lo que el informe sería necesariamente incompleto; y desde luego otra razón era que podría considerarse impropio que un noble se viera implicado en tales estudios), algunos amigos de Copenhague le persuadieron de que debería hacerlo para que hubiera una información fidedigna al respecto. El resultado fue un pequeño libro titulado *De Nova Stella (Sobre la nueva estrella)*, que apareció en 1573 y aportó un nuevo término al vocabulario astronómico: la palabra *nova*[4]. En este libro Tycho Brahe demostraba que el objeto no era ni un cometa, ni un meteoro, y que debía pertenecer a la «esfera» de estrellas fijas. También discutía el significado astrológico de la nova (en términos generales e imprecisos) y hacía una comparación con un objeto que Hiparco afirmaba haber visto en los cielos alrededor del año 125 a. C.

En aquella época era bastante fácil interpretar que cualquier cosa visible en los cielos tenía un significado astrológico, ya que gran parte de Europa estaba sumida en conflictos y confusión. Tras el éxito inicial del movimiento reformista, la Iglesia Católica estaba contraatacando, sobre todo a través de las actividades de los jesuitas en Austria y en los estados del sur de Alemania. En Francia, los protestantes hugonotes estaban sufriendo graves reveses en la fase central de lo que se ha llamado las Guerras de Religión francesas, y había sangrientas batallas en los Países Bajos entre los que luchaban por la independencia, y los españoles. Tycho Brahe difícilmente podía escribir un libro sobre una nueva estrella que aparecía en medio de aquella

confusión sin hacer alguna referencia en el sentido de la astrología. Pero los hechos clave estaban claramente expresados en *De Nova Stella*: que el objeto se encontraba en una posición fija entre las estrellas fijas y cumplía todos los criterios para ser considerado como una auténtica nueva estrella. Muchos otros astrónomos estudiaron también aquel objeto (incluido Thomas Digges, cuya postura era muy parecida a la de Tycho Brahe), pero las mediciones de Tycho eran indiscutiblemente las más precisas y fiables.

En todo esto hay un aspecto paradójico. Tycho Brahe hizo un estudio exhaustivo de la estrella en cuestión para ver si había algún rastro del cambio de paralaje que se podría esperar si la Tierra se movía realmente alrededor del Sol. Dado que Tycho Brahe era un observador tan extraordinario y había construido unos instrumentos tan precisos, esta búsqueda del paralaje fue la más sensible que se había realizado hasta la fecha. No pudo encontrar pruebas relativas al paralaje, lo cual fue un factor importante para convencerse de que la Tierra permanecía en posición fija mientras las estrellas giraban en torno a ella sobre su esfera de cristal.

La vida de Tycho Brahe no cambió inmediatamente a raíz de este trabajo sobre la nueva estrella (que actualmente recibe a veces el nombre de estrella de Tycho o supernova de Tycho), pero en 1573 sí se produjo un cambio significativo y se debió a razones de tipo personal. Entabló una relación permanente y empezó a vivir con una muchacha llamada Cristina (o Kirstine). Se sabe muy poco sobre Cristina, salvo que era una plebeya — según algunas informaciones al respecto, era hija de un granjero, pero otras hablan de que era una sirvienta que trabajaba en Knudstrup. Debido probablemente a que ambos pertenecían a distintas clases sociales, la pareja nunca llegó a formalizar su situación mediante el matrimonio. Sin embargo, en la Dinamarca del siglo XVI el casamiento formal se consideraba como una

opción adicional, ya que, según la ley, cuando era público y notorio que una mujer vivía con un hombre, gestionaba su casa y comía en su mesa, al cabo de tres años se convertía en su esposa. Por si pudiera existir alguna duda al respecto, algún tiempo después del fallecimiento de Tycho Brahe varios parientes suyos firmaron una declaración legal en la que se afirmaba que los hijos de la pareja eran legítimos y que su madre había sido la esposa de Tycho. Independientemente de su situación legal, la vida en común de esta pareja fue un éxito y aparentemente transcurrió feliz, y nacieron de ella cuatro hijas y dos hijos que sobrevivieron a la infancia, y dos niños más que murieron cuando eran muy pequeños.

En 1574, Tycho Brahe dedicó parte de su tiempo a realizar observaciones, la mayor parte del año en Copenhague, donde a petición del rey dio una serie de clases magistrales en la universidad. Sin embargo, aunque su prestigio iba en aumento, como indica el hecho de la petición real, Tycho Brahe no estaba satisfecho con las condiciones en que trabajaba en Dinamarca y pensó que podía conseguir más ayuda para su trabajo si se marchaba al extranjero. Después de viajar mucho durante 1575, parece ser que decidió establecerse en Basilea, aunque regresó a Dinamarca a finales del año para poner sus asuntos en orden y preparar el traslado. Sin embargo, en aquel momento la Corte era consciente de que la presencia de Tycho Brahe en Dinamarca aumentaba el prestigio del país y urgió al rey, que ya estaba predispuesto favorablemente, a hacer algo para que el famoso astrónomo se quedara en su patria. Tycho Brahe declinó la oferta de un castillo real en el que instalarse —quizá fue una decisión sabia, dadas las tareas y responsabilidades administrativas que podían ir unidas a este ofrecimiento, aunque la mayoría de los humanos no habrían rechazado una oferta así—. Impávido, el rey Federico no se dio por vencido y se le ocurrió la idea de regalar a Tycho Brahe la pequeña isla de Hveen, situada

en el estrecho que separa Copenhague y Elsinore. En la propuesta estaba incluido el ofrecimiento de pagar con los fondos reales la construcción de una buena casa en la isla y también una renta. En este caso se trataba de una oferta que Tycho Brahe realmente no podía rechazar. Por consiguiente, el 22 de febrero de 1576 hizo su primera visita a la isla en la que haría en el futuro la mayoría de sus observaciones, con las que empezó aquella misma tarde, realizando desde allí mismo una observación de la conjunción de Marte y la Luna.[5] El documento oficial en el que se asignaba la isla a Tycho Brahe fue firmado por el rey el 23 de mayo. Cuando sólo contaba 29 años, Tycho Brahe parecía tener su futuro asegurado.

Durante todo el tiempo que el rey Federico permaneció en el trono, Tycho Brahe pudo disfrutar de una libertad sin precedentes para dirigir su observatorio exactamente como él deseaba. La isla era pequeña —más larga que ancha en su forma y con unas tres millas de longitud de costa a costa a lo largo de su diagonal más grande— y su punto más alto, elegido como emplazamiento para la casa y el observatorio, estaba a tan sólo 50 metros sobre el nivel del mar. Al principio, el dinero no fue un problema, ya que, además de la renta, Tycho Brahe recibió más terrenos en la zona continental. Descuidó abominablemente sus deberes como propietario de estos terrenos, lo cual le llevaría finalmente a verse en serias dificultades, pero al principio parecía disfrutar de todos los beneficios sin asumir responsabilidad alguna. Incluso la canonjía prometida largo tiempo atrás acabó cayendo en sus manos en 1579. El observatorio fue bautizado con el nombre de Uraniborg, en honor de Urania, la musa de la astronomía, y a lo largo de los años se desarrolló hasta convertirse en una importante institución científica, con galerías para la observación, biblioteca y diversos despachos. Los instrumentos eran lo mejor que se podía comprar con dinero y, cuando la tarea de observar se desarrolló y llegaron a la isla

más ayudantes para trabajar con Tycho Brahe, se construyó un segundo observatorio próximo al primero. Tycho instaló una imprenta en Uraniborg para asegurarse la publicación de sus libros y de sus datos astronómicos (así como sus poemas, que eran bastante buenos) y construyó una fábrica de papel, cuando tuvo dificultades para conseguir este material imprescindible. Pero no hemos de hacernos a la idea de que Uraniborg fuera un auténtico precursor de lo que actualmente es un observatorio moderno o un complejo tecnológico. Incluso aquí, se reflejaba el misticismo de Tycho Brahe, concretamente en la disposición de los edificios, que pretendía nada menos que representar la estructura de los cielos.

Tycho Brahe observa un cometa

No es necesario hacer una descripción detallada del trabajo que llevó a cabo Tycho Brahe en la isla durante los veinte años siguientes, porque la mayor parte de lo que hizo fue desarrollar la monótona pero esencial tarea de medir noche tras noche las posiciones de los planetas con respecto a las estrellas fijas y analizar los resultados de estas mediciones. Para tener una perspectiva de lo que fue realmente su trabajo basta decir que se tarda cuatro años en observar con precisión las trayectorias de los movimientos del Sol «a través» de las constelaciones, doce años en observar las de Marte y lo mismo para las de Júpiter, y treinta años en concretar la órbita de Saturno. Aunque Tycho Brahe había comenzado a realizar observaciones a la edad de 16 años, sus primeras mediciones eran incompletas y menos precisas que las que hizo en la isla; incluso veinte años después, Hveen apenas cumplía los requisitos suficientes para el trabajo que Tycho estaba realizando. Este trabajo no empezó a dar sus primeros frutos hasta que Johannes Kepler se basó en las tablas de Tycho Brahe para explicar las órbitas de los planetas, años

después de que Tycho hubiera fallecido. Pero en 1577, mientras hacía su trabajo rutinario, Tycho Brahe observó un cometa brillante, y su minucioso análisis del movimiento del corneta demostró de una vez por todas que no podía ser un fenómeno local que tuviera lugar a menos distancia que la existente entre la Tierra y la Luna, sino que debía desplazarse entre los planetas, atravesando realmente sus órbitas. Al igual que las observaciones relativas a la superno va de 1572, este descubrimiento fue un golpe que echó por tierra las viejas teorías sobre los cielos, destrozando esta vez la idea de la existencia de unas esferas de cristal, ya que el cometa se movía atravesando los lugares en que se suponía que estaban las esferas.

Tycho Brahe vio este cometa por primera vez el 13 de noviembre de 1577, aunque ya había sido detectado en París y en Londres en una fecha anterior dentro del mismo mes. También otros observadores europeos calcularon que el cometa tenía que estar desplazándose entre los planetas, pero era un hecho universalmente reconocido que las observaciones de Tycho Brahe eran más precisas que las de cualquier otro y, según la opinión de la mayoría de sus contemporáneos, fue su trabajo el que resolvió la cuestión definitivamente. Durante los años inmediatamente siguientes se estudiaron por el mismo procedimiento otros cometas, de brillo más débil, y todos los estudios confirmaban estas conclusiones.

Su modelo del universo

Los estudios sobre el cometa y las observaciones anteriores relativas a la supernova animaron a Tycho Brahe a escribir un libro importante, *Astronomiae Instauratae Progymnasmata (Introducción a la nueva astronomía),* que se publicó en dos volúmenes en 1587 y 1588.[6] Fue en este libro donde expuso su modelo del universo, que desde un punto de vista moderno parece un paso

atrás, porque es una especie de solución intermedia entre el sistema de Tolomeo y el de Copérnico. Sin embargo, ciertos elementos del modelo de Tycho Brahe abrían nuevas vías y dicho modelo merece más crédito del que se le da habitualmente.

Según la idea de Tycho Brahe, la Tierra está fija en el centro del universo, mientras el Sol, la Lima y las estrellas fijas describen órbitas alrededor de la Tierra. El propio Sol se consideraba como el centro de las órbitas de los cinco planetas, siendo las de Mercurio y Venus unas órbitas menores que la del Sol alrededor de la Tierra. Marte, Júpiter y Saturno se desplazan describiendo órbitas que están centradas en el Sol, pero que incluyen tanto al Sol como a la Tierra dentro de dichas órbitas. Este sistema suprime los epiciclos y los círculos deferentes, pero explica por qué el movimiento del Sol estaba interrelacionado con los movimientos de los planetas. Además, al desplazar el centro de las órbitas planetarias fuera de la Tierra, Tycho Brahe rellenó la mayor parte del espacio que se extendía hasta la supuesta posición de las estrellas fijas —que en el modelo de Tycho Brahe estaba a una distancia equivalente a 14 000 veces el radio de la Tierra (por supuesto, no había problema con el paralaje, porque en este modelo la Tierra no se mueve)—. Pero la idea realmente importante y que se podría considerar moderna dentro de todo esto es que Tycho no consideraba que las órbitas estuvieran asociadas a nada físico, como unas esferas de cristal, sino que vio estas órbitas meramente como unas relaciones geométricas que describían el movimiento de los planetas. Aunque no lo expresó de esta manera, fue el primer astrónomo que imaginó que los planetas flotaban en el espacio vacío sin nada que los sujetase.

Sin embargo, en otros aspectos la teoría de Tycho Brahe era menos moderna. No podía aceptar lo que llamaba el «absurdo físico», admitir que la Tierra se movía, y estaba convencido de que, si la Tierra realizara un movimiento de rotación sobre su

eje, entonces una piedra que cayera de lo alto de una torre se desviaría hacia un lado a cierta distancia de la torre, ya que la Tierra se movería bajo la piedra mientras ésta iba cayendo. También es importante constatar que en aquella época la oposición más virulenta al sistema copernicano seguía llegando de las iglesias protestantes del norte de Europa, mientras que la Iglesia Católica ignoraba ampliamente esta teoría (Giordano Bruno todavía no había provocado la oposición de la Iglesia Católica a estas teorías). A finales del siglo XVI la tolerancia religiosa no era precisamente un rasgo característico de Dinamarca y nadie cuya posición dependiera completamente del patrocinio del rey habría sido tan loco como para promocionar las teorías copernicanas, por mucho que creyera en ellas (lo cual está claro que no era el caso de Tycho Brahe).

Mientras continuaban las observaciones rutinarias (tan importantes para la ciencia, pero tan aburridas para detallarlas aquí), la posición de Tycho Brahe en Hveen se vio amenazada al producirse el fallecimiento de Federico II en 1588, justo cuando su libro se estaba imprimiendo. El sucesor del rey Federico, su hijo Cristián, sólo tenía 11 años de edad cuando su padre murió, por lo que los nobles daneses eligieron a cuatro de entre ellos para que actuaran como tutores hasta que Cristián cumpliera 20 años. Al principio, no cambió prácticamente la actitud del gobierno con respecto a Tycho Brahe —de hecho, aquel mismo año, un poco más adelante, el gobierno aportó una suma de dinero para cubrir las deudas en que Tycho había incurrido para construir su observatorio—. Durante sus últimos años en Hveen, Tycho Brahe estuvo considerado, sin lugar a dudas, como una gran institución nacional y recibió a muchos visitantes distinguidos, incluido Jacobo VI de Escocia (el que posteriormente, a la muerte de Isabel I, se convertiría en Jacobo I de Inglaterra), que había acudido a Escandinavia para contraer matrimonio con Ana, una de las hermanas del rey

Cristián. Tycho y Jacobo hicieron buenas migas, por lo que el rey garantizó al erudito los derechos de autor durante treinta años para todos los escritos que publicara en Escocia. Otros visitantes no fueron tan agradables y desde luego a Tycho Brahe no le encantaba exhibirse siempre como un mono de feria. Llegó a ofender a varios miembros de la nobleza con los bruscos modales que tenía con los visitantes que no le agradaban, así como por burlarse del protocolo asignando un lugar de honor en la mesa a su esposa plebeya y consuetudinaria. Aunque no conocemos todos los motivos, no hay duda de que Tycho Brahe se sentía cada vez más insatisfecho con sus condiciones de trabajo en Hveen ya en 1591, cuando por carta le decía a un amigo que existían ciertos obstáculos desagradables que entorpecían su trabajo y que esperaba superarlos; comentaba asimismo que «cualquier tierra es un buen país para el valiente, y los cielos están en todos los lugares encima de nuestras cabezas».[7] Tycho Brahe también riñó con algunos de sus arrendatarios del continente y llegó a tener problemas con el consejo municipal por descuidar el mantenimiento de una capilla que formaba parte de sus propiedades. Sin embargo, parece ser que ninguno de estos hechos consiguió distraer a Tycho Brahe ni afectar a sus observaciones, que se plasmaron en un importante catálogo de posiciones de las estrellas fijas, que llegaban al millar en 1595, aunque sólo 777 de las posiciones mejor estimadas llegaron finalmente a publicarse en el primer volumen de la *Progymnasmata* editada por Kepler.

Un año más tarde, el rey Cristián IV fue coronado y pronto empezó a hacer sentir su presencia. Cristián consideró que era necesario ahorrar en casi todos los sectores en que actuaba el Estado, y entre otras muchas cosas recuperó inmediatamente las propiedades continentales cuya administración había concedido el rey Federico II a Tycho Brahe. La mayoría de los amigos que éste tenía en la Corte habían muerto ya (el propio Ty-

cho se acercaba a los 50 años de edad) y el rey pensó, probablemente con razón, que, puesto que Uraniborg estaba construido ya desde hacía mucho tiempo y funcionaba perfectamente, sería posible mantener allí la actividad con un presupuesto mucho más reducido. Sin embargo, Tycho Brahe estaba acostumbrado a que se le tratara con una indulgencia considerable y consideraba cualquier reducción de sus ingresos no sólo como un insulto, sino también como una amenaza para su trabajo. Si no podía mantener Uraniborg al nivel que él deseaba, con gran cantidad de ayudantes, impresores, fabricantes de papel y todo lo demás, no lo mantendría de ninguna manera.

La situación llegó al límite en marzo de 1597, cuando el rey suprimió la pensión anual de Tycho Brahe. Aunque a pesar de esto seguía siendo un hombre rico, Tycho Brahe consideró que era la gota que colmaba el vaso e inmediatamente hizo planes para marcharse a otro lugar. Abandonó la isla en abril de 1597 y pasó unos pocos meses en Copenhague antes de partir de viaje, inicialmente a Rostock, acompañado por un séquito de unas veinte personas (estudiantes, ayudantes, etc.) y llevándose sus instrumentos portátiles más importantes y su prensa de imprimir.

En Rostock parece ser que Tycho Brahe pensó el asunto dos veces, ya que escribió lo que él consideraba probablemente una carta conciliadora al rey Cristián, en la que le decía (entre muchas otras cosas) que, si tenía la oportunidad de continuar sus trabajos en Dinamarca, «no se negaría a hacerlo». Lo único que consiguió con esta carta fue empeorar la situación. A Cristián le ofendió el tono arrogante de Tycho Brahe y la forma en que se dirigía a él tratándolo como a un igual, en gran medida a causa de esta frase altanera en la que estaba implícito que Tycho Brahe podría rechazar una petición del rey. En su respuesta dijo: «nos resulta muy desagradable saber que buscáis la ayuda de otros príncipes, como si nosotros o el reino fuéramos tan

pobres que no pudiéramos disponer dicha ayuda, salvo que fuerais a mendigar donde otros con vuestra esposa y vuestros hijos. Pero, dado que esto está ya hecho, hemos de dejarlo así y no podrá ya preocuparnos si abandonáis el país o permanecéis en él». Debo admitir que siento por Cristián bastante más simpatía que la que suele inspirar a otros autores en general, y pienso que un individuo menos arrogante que Tycho Brahe podría haber conseguido llegar a un acuerdo con el rey sin marcharse de Hveen. Pero, sin embargo, un individuo menos arrogante que Tycho Brahe no habría recibido un portazo en las narices y tampoco habría llegado a ser un gran astrónomo de primera fila.

Después de haber quemado todas sus naves, Tycho Brahe continuó viaje hacia Wandsbeck, cerca de Hamburgo, donde reanudó su programa de observaciones (realmente los cielos estaban «en todos los lugares encima de su cabeza»), mientras buscaba una nueva base permanente para realizar su trabajo. Esta búsqueda acabó con una invitación del emperador del Sacro Imperio Romano, Rodolfo II, un hombre mucho más interesado en la ciencia y el arte que en la política. Esta característica de Rodolfo II fue muy positiva para Tycho Brahe, pero tuvo malas consecuencias para la mayor parte de Centroeuropa, donde el reinado de este emperador, en parte por sus escasas cualidades como político (algunos historiadores piensan que en realidad estaba loco), condujo a la Guerra de los Treinta Años. Tycho Brahe llegó a Praga, la capital del Imperio, en junio de 1599, después de dejar a su familia en Dresde. Tras una audiencia con el emperador, recibió el nombramiento de matemático imperial, le fue asignada una buena renta y se le ofreció elegir entre tres castillos para instalar su observatorio. Tycho Brahe eligió Benatky, situado 35 kilómetros al nordeste de Praga, y abandonó la ciudad con cierto alivio —en un informe contem-

poráneo se describe las murallas de la ciudad de la siguiente manera:

> Ni mucho menos fuertes y, salvo que el hedor de las calles haga retroceder a los turcos… hay pocas esperanzas de que las fortificaciones puedan hacerlo. Las calles están llenas de inmundicias, hay varios mercados grandes, los muros de algunas casas son de piedra de sillería, pero la mayoría son de madera y barro, y están construidas con poco arte y carecen de estética, siendo las paredes de troncos de árboles tal como se sacan del bosque, y en ellas la corteza está trabajada de una forma tan tosca que se puede ver a ambos lados del muro.

Una diferencia abismal con respecto a la tranquilidad y la comodidad de Uraniborg. No es sorprendente que, hacia finales de 1599, Tycho Brahe pasara varias semanas en una residencia imperial aislada en el campo para huir del brote de una plaga. Cuando esta amenaza pasó y su familia llegó desde Dresde, Tycho Brahe comenzó los preparativos para instalarse en el castillo y envió a su hijo mayor a Dinamarca para que le llevara de Hveen cuatro grandes instrumentos de observación. Se tardó mucho tiempo en trasladar los instrumentos a Benatky y el castillo tuvo que ser adaptado para convertirlo en un observatorio adecuado. No es de extrañar que Tycho Brahe, que pasaba ya de los cincuenta años, no realizara observaciones importantes en este lugar durante el breve tiempo que faltaba para su muerte. Sin embargo, antes de llegar a Praga, había iniciado una correspondencia que le garantizaría el mejor uso posible para la obra que había realizado durante su vida. De esto se encargaría el miembro más capaz de la generación siguiente de astrónomos: Johannes Kepler.

Johannes Kepler: ayudante y heredero de Tycho Brahe

Kepler no tuvo ninguna de las ventajas de que disfrutó Tycho Brahe por la situación social en que nació y que le facilitaron sus comienzos. Aunque Kepler procedía de una familia que en otros tiempos había pertenecido a la nobleza y tenía su pro-

pio escudo de armas, el abuelo de Johannes, Sebald Kepler, había sido un peletero que hacia 1520 se trasladó de Nüremberg, su ciudad natal, a Weilderstadt, no lejos de Stuttgart, en el sur de Alemania. Sebald tuvo éxito como artesano y ascendió de categoría dentro de la comunidad, ejerciendo como alcalde (*Bürgermeister*) durante algún tiempo. Llegar a dicho cargo no tuvo poco mérito, dado que era un luterano que vivía en una ciudad donde predominaban los católicos; está claro que Sebald trabajó duro y se convirtió en un pilar de la comunidad. Difícilmente se podría decir lo mismo de su hijo mayor, Heinrich Kepler, que fue un despilfarrador y un borracho cuyo único empleo duradero fue el de soldado mercenario al servicio de cualquier príncipe que necesitara contratar tropas. Se casó joven con una mujer llamada Katharina y la pareja compartió una casa con varios de los hermanos menores de Heinrich. El matrimonio no funcionó bien. A los defectos de Heinrich se sumaba el hecho de que la propia Katharina era aficionada a discutir y resultaba difícil convivir con ella. Esta mujer tenía una gran fe en los poderes curativos de los remedios caseros, como las hierbas y otros parecidos, una creencia que no dejaba de ser algo muy frecuente en aquella época, pero que iba a dar como resultado finalmente su encarcelamiento como sospechosa de brujería, lo cual ocasionó gran aflicción a Johannes.

Johannes Kepler tuvo, sin lugar a dudas, una infancia difícil y además bastante solitaria (su único hermano, Christoph, era mucho más joven que él). Nació el 29 de diciembre de 1571 y, cuando sólo contaba 2 años de edad, su padre se marchó a combatir en los Países Bajos y Katharina le siguió, dejando al niño con su abuelo. Heinrich y Katharina regresaron en 1576 y la familia se trasladó a Leonberg, en el ducado de Württemberg. Pero en 1577 Heinrich se marchó otra vez a la guerra. A la vuelta, probó suerte en distintos negocios, incluido el preferido por los borrachos, es decir, regentar una taberna, actividad a la

que se dedicó en 1580 en la ciudad de Ellmendingen. Como era de esperar, perdió todo su dinero. Finalmente, se decidió a probar suerte una vez más como mercenario y la familia no volvió a verle nunca más. No se sabe con seguridad cuál pudo ser su destino, aunque es posible que tomara parte en una campaña naval en Italia; en cualquier caso, desapareció para siempre.

Con todo este ajetreo, a Johannes lo mandaban de un hogar a otro y de una escuela a otra, pero al menos su familia estaba a la suficiente altura dentro de la escala social como para que el niño pudiera acudir a una escuela, gracias a las becas que concedía una fundación creada por los duques de Württemberg. Como si su infancia no fuera ya bastante penosa, mientras estaba con su abuelo contrajo la viruela, a consecuencia de la cual su vista quedó afectada para el resto de su vida, de tal forma que nunca podría ser un observador de los cielos, como lo había sido Tycho Brahe. Pero su cerebro no resultó dañado y, aunque a menudo su formación se retrasaba por los cambios de escuela cada vez que su familia se trasladaba, sin embargo, a la edad de 7 años fue admitido en una de las nuevas *Lateinschule* (escuelas latinas) en Leonberg. Estas escuelas se habían fundado después de la Reforma y su objetivo primordial era preparar hombres para la prestación de servicios dentro de la Iglesia o en la administración del Estado; en dichas escuelas sólo se hablaba latín, con el fin de inculcar a los alumnos la lengua que utilizaban todas las personas cultas en aquella época. A causa de todas las interrupciones que sufrió su escolarización, Johannes Kepler tardó cinco años en terminar lo que tenía que haber sido un período de tres años de clases —pero con el título de una de estas escuelas podía presentarse a un examen para ser admitido en un seminario y prepararse para el sacerdocio, que era el camino obvio y tradicional que tenía que seguir un joven inteligente para salir de la pobreza y librarse de vivir toda su vida sometido a duros trabajos—. Aunque el interés de Kepler por la astro-

nomía ya había despertado cuando éste era sólo un niño y vio (en dos ocasiones diferentes) un brillante cometa (el mismo que Tycho Brahe estudió en 1577) y un eclipse de Luna, daba la impresión de que su futuro dentro de la Iglesia estaba ya claramente perfilado cuando pasó un examen en 1584 y fue admitido en una escuela en Adelberg a la edad de 12 años. El idioma de esta escuela, una vez más, era el latín y Kepler llegó a poder utilizarlo con fluidez.

Aunque en esta escuela se imponía una severa disciplina y Kepler era un joven enfermizo que se encontraba a menudo indispuesto, demostró ser tan prometedor académicamente, que pronto lo trasladaron a una escuela de nivel más avanzado situada en Maulbronn y sus tutores le dieron la preparación necesaria para entrar en la Universidad de Tubinga donde iba a completar sus estudios de teología. Superó el examen de acceso a la universidad en 1588, pero posteriormente tuvo que realizar un último curso durante un año en Maulbronn antes de poder ocupar su plaza en la universidad a la edad de 17 años. Aunque se estaba formando para llegar a ser sacerdote, entre las materias que Kepler tuvo que estudiar durante los dos primeros años en Tubinga estaban las matemáticas, la física y la astronomía, y en todas ellas fue un alumno destacado. Tras adquirir la titulación correspondiente a este ciclo en 1591, siendo el segundo en una clase de catorce alumnos, comenzó sus estudios de teología con un informe en el que sus tutores hacían constar que era un estudiante excepcional.

Entretanto, aprendió también algo que no figuraba en el programa oficial. El catedrático de matemáticas de aquella universidad era Michael Maestlin, que explicó debidamente a sus alumnos en las clases oficiales el sistema de Tolomeo, aprobado por la Iglesia Reformada. Sin embargo, en privado, Maestlin explicó también el sistema de Copérnico a un selecto grupo de alumnos prometedores, entre los que se encontraba Kepler. Es-

tas explicaciones impresionaron profundamente al joven, que inmediatamente vio el potencial y la sencillez que tenía el modelo del universo centrado en el Sol. Pero su disposición a aceptar el modelo copernicano no fue el único motivo para que Kepler se desviara de las estrictas doctrinas luteranas de la época. Además, tenía serias dudas con respecto al significado religioso de algunos de los rituales de la Iglesia y, aunque creía firmemente en la existencia de Dios, nunca encontró una Iglesia formalmente establecida con unas doctrinas y unos rituales que pudieran convencerle, por lo que persistió siempre en practicar el culto a su manera —una actitud claramente peligrosa en aquellos tiempos conflictivos.

Nunca sabremos cómo habría conciliado Kepler sus propias creencias con el papel que debía desempeñar un pastor luterano, ya que en 1594, el año en que debía haber finalizado sus estudios de teología, su vida cambió a causa de un fallecimiento que tuvo lugar a mucha distancia, en la ciudad austríaca de Graz. A pesar de la lejanía geográfica, había un seminario en Graz que siempre había mantenido unas estrechas relaciones académicas con la Universidad de Tubinga y, cuando murió el profesor de matemáticas de dicho seminario, como era lógico los miembros de la dirección del centro solicitaron a Tubinga que propusiera un sustituto. Las autoridades académicas de la Universidad de Tubinga recomendaron a Kepler, al que sorprendió bastante que le ofrecieran la plaza precisamente cuando estaba a punto de comenzar su actividad como pastor luterano. Aunque tuvo ciertas dudas al principio, se dejó convencer de que él era el mejor candidato para ocupar aquel puesto y aceptó con la condición de que, si lo deseaba, podría regresar a la universidad al cabo de un par de años para terminar su formación y convertirse en ministro de la Iglesia Luterana.

Aquel profesor de matemáticas de 22 años de edad llegó a Graz el 11 de abril de 1594. Aunque todavía se encontraba den-

tro del Sacro Imperio Romano, había cruzado una importante frontera invisible, desde los estados del norte donde las iglesias reformadas dominaban, a la región del sur donde la influencia católica era dominante. Sin embargo, esta frontera invisible cambiaba continuamente, ya que en virtud del tratado conocido como la Paz de Habsburgo, firmado en 1555, cada príncipe (o duque, o lo que fuera) era libre de decidir cuál era la religión apropiada para sus dominios. Había docenas de príncipes que gobernaban pequeños estados dentro del «Imperio», y la religión del Estado cambiaba a veces literalmente de la noche a la mañana cuando un príncipe moría o era derrocado y accedía al poder otro príncipe que tenía unas convicciones religiosas diferentes. Algunos príncipes eran tolerantes y permitían la libertad de culto; otros insistían en que todos sus súbditos se convirtieran a las nuevas tendencias, so pena de ver sus propiedades confiscadas inmediatamente. Graz era la capital de un pequeño Estado llamado Estiria y gobernado por el archiduque Carlos, que estaba decidido a aplastar el movimiento protestante, aunque en la época en que llegó Kepler se toleraban todavía algunas excepciones como el seminario luterano de Graz.

Kepler era un hombre pobre que no disponía de recursos económicos procedentes de su familia —sus estudios universitarios habían sido pagados mediante una beca y, para hacer el viaje a Graz, tuvo que pedir dinero prestado—. Su situación no mejoró cuando los miembros de la dirección del seminario decidieron asignarle los tres cuartos del salario hasta que demostrara su valía. Sin embargo, existía un trabajo mediante el cual podía ganar algo de dinero y granjearse las simpatías de la alta sociedad de Graz: confeccionar horóscopos. A lo largo de su vida, Kepler utilizó la astrología como un medio para mejorar unos ingresos que siempre fueron escasos. No obstante, era plenamente consciente de que aquel asunto era una pura tontería y, mientras adquiría habilidades en el arte de hablar me-

diante generalidades ambiguas y decir a cada persona lo que ésta deseaba oír, en su correspondencia privada se refería a los clientes denominándolos «imbéciles» y decía que la astrología era un asunto «tonto y vacío». Un buen ejemplo de la habilidad de Kepler en este arte que menospreciaba tanto es lo que hizo cuando le encargaron un calendario del año 1595 en el que tenía que predecir los acontecimientos importantes que se iban a producir durante aquel año venidero. Entre las predicciones que tuvieron éxito cabe mencionar las rebeliones de los campesinos de Estiria, las incursiones de los turcos en Austria desde el este y un invierno frío. Su habilidad para revestir con un galimatías astrológico estas predicciones de sentido común no sólo consolidaron su reputación en Graz, sino que consiguió que su salario aumentase hasta el nivel correspondiente al puesto que ocupaba.

Sin embargo, aunque se puede suponer que Kepler era menos supersticioso que muchos de sus iguales, estaba todavía demasiado inclinado hacia la mística para que se le pueda considerar como el primer científico. Esto se percibe claramente en su primera contribución importante al debate cosmológico, que hizo que su fama se propagara mucho más allá de la frontera de Estiria.

KEPLER CONSTRUYE UN MODELO GEOMÉTRICO DEL UNIVERSO

Kepler nunca pudo ser eficaz como observador de los cielos debido a su mala vista y en Graz no tenía acceso a datos resultantes de observaciones. En consecuencia, no le quedaba más posibilidad que seguir mentalmente las huellas de los avances realizados por los científicos de la Antigüedad, utilizando la razón pura y la imaginación para encontrar una explicación de la naturaleza del cosmos. El asunto que le tenía especialmente intrigado por aquel tiempo era por qué tenía que haber seis, y só-

lo seis, planetas en el universo, aceptando que Copérnico tuviera razón cuando decía que la Tierra en sí misma era también un planeta. Después de darle vueltas a esta cuestión durante cierto tiempo, Kepler tuvo la idea de que el número de planetas podía estar relacionado con el número de figuras tridimensionales o sólidos regulares que se podían construir utilizando la geometría euclídea. Todos estamos familiarizados con el cubo, que tiene seis caras cuadradas idénticas. Los otros cuatro sólidos regulares son: el tetraedro, formado por cuatro caras triangulares iguales; el dodecaedro, formado por doce pentágonos idénticos; el icosaedro, que es una figura más complicada, con veinte caras que son triángulos idénticos; y el octaedro, formado por ocho triángulos.

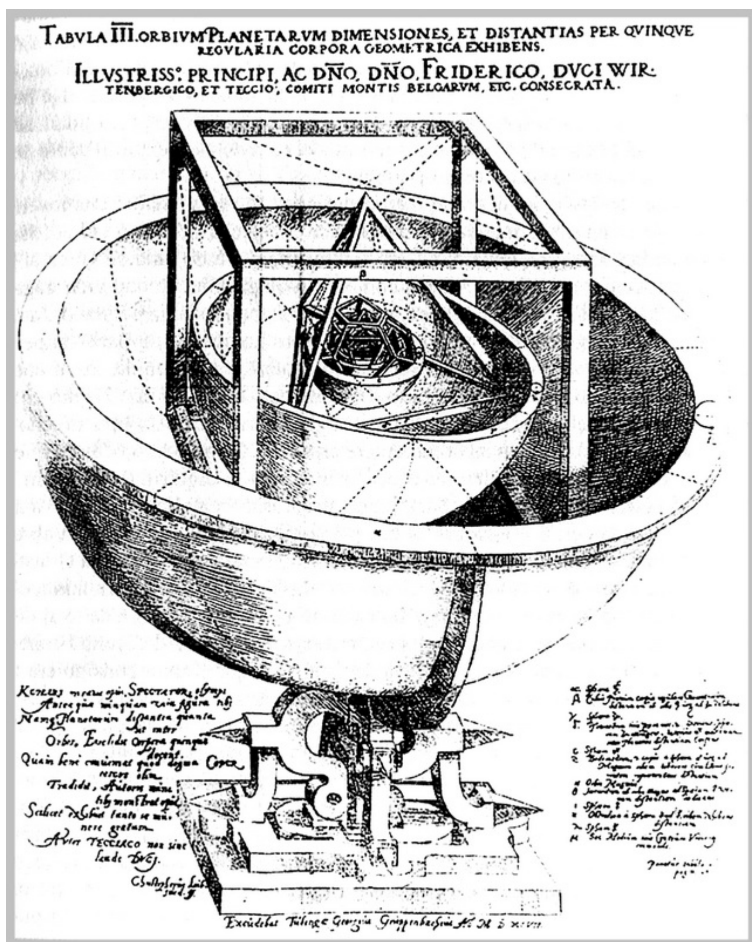
La brillante idea que se le ocurrió a Kepler fue encajar estas figuras, imaginariamente, las unas dentro de las otras, de tal forma que en cada caso los vértices de la figura interna tocaran la superficie de una esfera que rodeaba el sólido, y que esta esfera, a su vez, tocara las caras internas de las superficies de la siguiente figura que envolvía a esta esfera dentro del conjunto de figuras anidadas. Teniendo en cuenta que se utilizaban cinco sólidos euclídeos y una esfera dentro del sólido más interno, así como otra por fuera del más externo, eran en total seis esferas —una por cada órbita planetaria—. Situando el octaedro en el medio, rodeando al Sol e incluyendo en su interior una esfera con la órbita de Mercurio, seguido de un icosaedro, un dodecaedro, un tetraedro y un cubo, Kepler consiguió un espaciamiento entre las distintas esferas que correspondía más o menos al espaciamiento entre las órbitas que describen los planetas alrededor del Sol.

La coincidencia no pasaba de ser aproximada y se basaba en una creencia mística según la cual los cielos debían estar gobernados por la geometría, en vez de basarse en algo que pudiéramos llamar ciencia. Este modelo quedó obsoleto en cuanto el

propio Kepler demostró que las órbitas de los planetas eran elípticas, es decir, como una circunferencia que, en vez de ser circular, es alargada. De todas formas, hoy en día sabemos que hay más de seis planetas, por lo que no tiene sentido una interpretación geométrica en estos términos. Pero cuando se le ocurrió la idea a Kepler a finales de 1595, le pareció una especie de revelación divina, lo cual es paradójico, ya que al adoptar el modelo copernicano con el Sol en el centro del universo, la teoría de Kepler chocaba con la doctrina luterana, a pesar de que él seguía siendo luterano —al menos una especie de luterano.

Kepler pasó el invierno de 1595-1596 desarrollando su teoría con todo detalle y mantuvo correspondencia al respecto con su antiguo maestro Michael Maestlin. A principios de 1596, se le concedió un permiso que le liberaba temporalmente de su trabajo como profesor para ir a ver a sus abuelos enfermos y aprovechó la oportunidad para visitar a Maestlin en Tubinga. Maestlin animó a Kepler a desarrollar sus teorías en un libro y supervisó la impresión de esta obra, que se publicó en 1597, poco después de que Kepler volviera a retomar sus funciones en Graz (más bien tarde, pero entre nubes de gloria por ser autor de un modelo que era ampliamente discutido en aquel momento). El libro se conoce en general con el título *Mysterium Cosmographicum* (*El misterio del cosmos*) y contiene una teoría que, en una visión retrospectiva, es aún más importante que el modelo de los sólidos geométricos encajados que se describe en él. Kepler recogía la afirmación de Copérnico según la cual los planetas se mueven en sus órbitas más lentamente cuanto más lejos se encuentran del Sol y sugirió que se mantenían en movimiento en dichas órbitas por efecto de una fuerza (él la llamó «vigor») procedente del Sol que los impulsaba en su trayectoria. Afirmó que ese «vigor» era menos vigoroso (por decirlo así) cuanto mayor fuera la distancia al Sol, por lo que haría que

los planetas más distantes se movieran más lentamente. Esta idea, estimulada en parte por el trabajo de William Gilbert sobre magnetismo (en el capítulo próximo hablaremos más de esto) constituyó un importante paso hacia adelante porque sugería la existencia de una causa física para explicar el movimiento de los planetas, en un momento en que la mejor teoría que se había desarrollado previamente decía que los planetas eran impulsados por ángeles. Kepler dijo concretamente: «mi propósito… es demostrar que la máquina del universo no es como un ser animado por la Divinidad, sino como un reloj».[8]



8. Modelo de universo construido por Kepler como serie de formas geométricas encajadas. (Kepler, *Mysterium Cosmographicum*. 1596).

Kepler envió copias de su libro a los pensadores más eminentes de su tiempo, entre los cuales cabe mencionar a Galileo (que no se molestó en enviar comentario alguno como respuesta, pero mencionó el nuevo modelo en sus clases magistrales) y al más importante de todos, Tycho Brahe, que en aquel momento se encontraba residiendo en Alemania. Tycho Brahe contestó a Kepler con una crítica detallada de su obra y quedó impresionado por las habilidades matemáticas del autor del libro, aunque la idea de un universo centrado en el Sol era toda-

vía anatema para él. De hecho, Tycho Brahe estaba tan impresionado que le planteó a Kepler la posibilidad de que éste se uniera al equipo de ayudantes que trabajaban con el anciano. Pronto se vio que esta oferta era extremadamente oportuna.

En abril de 1597, Kepler contrajo matrimonio con Barbara Müller, una joven viuda que era hija de un rico comerciante. Aunque su necesidad de seguridad económica pudo haber sido un factor que le impulsara al matrimonio, todo funcionó bien al principio, ya que Kepler cobraba el salario completo y disfrutaba de una vida hogareña feliz. Sin embargo, dos hijos de la pareja murieron siendo todavía pequeños, aunque posteriormente tuvieron otros tres que sobrevivieron. La familia de Barbara, pensando que se había casado por debajo de su posición social, retuvo un dinero al que ella tenía derecho y, en consecuencia, se puso de manifiesto que vivir con Kepler contando únicamente con el sueldo de profesor (aunque fuera completo) era mucho más duro que vivir como la hija de un comerciante próspero. Hubo otro problema que surgió debido a las ansias de Kepler por consolidar su recién adquirida reputación, asociándose con otros matemáticos y discutiendo sus teorías con ellos. Escribió una carta al matemático imperial, Reimarus Ursus, para pedirle su opinión sobre la obra que él mismo había realizado y lo alabó con adulaciones diciendo que Ursus era el matemático más grande de todos los tiempos. Ursus no se molestó en responder, aunque sacó de contexto las alabanzas de Kepler y las publicó como una especie de aval de una parte de su propia obra en la que, por cierto, criticaba las teorías de Tycho Brahe. Fue necesaria una larga correspondencia llena de tacto para que Kepler consiguiera finalmente aplacar a Tycho, que se sentía lógicamente ofendido, y restablecer unas relaciones amistosas con este gran astrónomo. Kepler anhelaba cada vez más que Tycho Brahe le diera una oportunidad de acceder a su ya legendaria abundancia de datos derivados de observa-

ciones, para poder comprobar sus teorías sobre las órbitas planetarias utilizando aquellas cifras exactas relativas al movimiento de los planetas.

Mientras sucedía todo esto, la situación política se iba deteriorando en Estiria. En diciembre de 1596, el archiduque Fernando, que era un católico piadoso, se hizo con el gobierno de este pequeño Estado. Al principio, actuó despacio para reformar (o contrarreformar) este Estado de manera que fuera más de su agrado, pero, después de unos pocos meses, la comunidad protestante, indignada porque los cambios en los impuestos favorecían a los católicos a sus expensas y por otras «reformas», presentó una lista oficial de quejas relativas al trato de que estaban siendo objeto con el nuevo régimen. Fue un gran error —y probablemente la respuesta que el archiduque Fernando había intentado provocar con el fin de poder presentar a los protestantes como unos alborotadores ingobernables—. Después de una visita que realizó a Italia durante la primavera de 1598, donde tuvo una audiencia con el Papa y visitó los santos lugares, el archiduque Fernando regresó decidido a barrer de Estiria la influencia protestante. En septiembre, se hizo público un edicto en el que se conminaba a todos los maestros y teólogos protestantes a abandonar el Estado en un plazo de dos semanas o a convertirse al catolicismo. No había más remedio que obedecer y Kepler fue uno de los muchos luteranos expulsados que se refugiaron en los estados vecinos —aunque la mayoría partieron dejando allí a sus esposas y sus familias con la esperanza de que pronto se les permitiría regresar—. Sin embargo, entre todos los que formaban el contingente de refugiados expulsados de Graz, Kepler fue el único al que se permitió volver en el plazo de un mes, por razones que no están del todo claras, pero que pueden tener que ver en gran medida con su creciente prestigio como matemático. Después de todo, además de enseñante, Kepler era el matemático del distrito, un cargo que lleva-

ba implícita la condición de residir en Graz (aunque el archiduque hubiera podido sencillamente destituirlo y nombrar a otro como matemático del distrito). No obstante, las severas condiciones bajo las cuales tuvo que vivir Kepler a partir de aquel momento quedan reflejadas en el hecho de cuando su hija falleció y él eludió celebrar los funerales religiosos, no se le permitió enterrar a la niña hasta después de haber pagado una multa por esta omisión.

En 1599, cuando la situación en que se encontraba Kepler en Graz llegó a ser intolerable, Tycho Brahe estaba en pleno proceso de instalarse a unos 320 kilómetros de distancia, cerca de Praga, en un lugar en que las personas tenían libertad para practicar los cultos religiosos a su propia manera. En enero del año 1600 llegó una oferta que iba a transformar la vida de Kepler. Un noble de Estiria llamado barón Hoffman, que estaba impresionado por la obra de Kepler y le apreciaba como matemático, era a la sazón consejero del emperador Rodolfo II y había conocido a Tycho Brahe. Como consecuencia de estas circunstancias, tuvo lugar en el castillo de Benatky el 4 de febrero de 1600 el primer encuentro entre Johannes Kepler y Tycho Brahe, los dos hombres que con posterioridad establecerían conjuntamente los cimientos de la astronomía científica. Tycho Brahe tenía entonces 53 años de edad y Kepler sólo 28. Tycho tenía el mayor conjunto de datos astronómicos precisos que se había reunido hasta entonces, pero estaba cansado y necesitaba ayuda para analizar todo este material. Kepler no tenía más que habilidad matemática y un deseo ardiente de desvelar los misterios del universo. Esta alianza podría parecer ideal, pero aún existían obstáculos que fue necesario superar antes de que Kepler lograra los avances que le convertirían en una figura clave de la historia de la ciencia.

Aunque en aquel momento la intención de Kepler había sido realizar una breve visita a Tycho Brahe (había dejado a su espo-

sa y a su hijastra en Graz y no había presentado su renuncia al cargo que tenía allí), esta visita se convirtió en una larga estancia. Este Kepler empobrecido necesitaba desesperadamente un puesto oficial con su correspondiente retribución para poder trabajar con Tycho Brahe, y necesitaba con igual desesperación acceder a aquellos datos, que Tycho Brahe le suministraba sólo en pequeñas dosis, ya que tomaba sus precauciones a la hora de dar vía libre para que una persona relativamente extraña dispusiera de la obra de toda su vida. El extenso séquito que rodeaba a Tycho y las obras de construcción que se estaban realizando en el castillo para convertirlo en un observatorio hicieron que a Kepler le fuera difícil ponerse a trabajar. Además, Kepler ofendió sin darse cuenta a uno de los principales ayudantes de Tycho Brahe. Este ayudante había estado intentando resolver el problema de calcular la órbita de Marte y Kepler se ofreció para hacerse cargo de la tarea (una oferta que fue interpretada como un gesto arrogante por parte de Kepler, al entender que éste se colocaba a sí mismo en un plano superior como matemático). Al darse cuenta de que Tycho Brahe nunca le permitiría llevarse una copia de sus datos para poder trabajar con ella en casa, y de que el único modo de conseguir resolver el enigma era quedarse allí durante un año o más, Kepler (que también era muy consciente de que no había nadie que le superase en capacidad matemática) hizo una lista de todo lo que pedía a cambio de quedarse en el castillo. Dio la lista a un amigo, pidiéndole que mediara con Tycho Brahe, pero Tycho se hizo cargo personalmente de dicha lista y se mostró ofendido por lo que consideraba unas exigencias excesivas por parte de Kepler, aunque de hecho ya había estado negociando con el emperador Rodolfo para conseguirle a Kepler un cargo oficial. Finalmente, las cosas se arreglaron, y la concordia llegó a tal punto que Tycho se ofreció a pagar los gastos del traslado de Kepler desde Graz y

le garantizó que el emperador pronto le concedería un cargo remunerado.

En junio de 1600, Kepler regresó a Graz para arreglar sus asuntos allí —en realidad, sólo para verse confrontado con un ultimátum de los gobernantes de la ciudad, que, irritados por sus largas ausencias, querían enviarle a Italia para que estudiara con el fin de obtener un título de médico, de tal forma que pudiera ser más útil a la comunidad—. Antes de que Kepler tuviera tiempo de decidirse en algún sentido, el deterioro de la situación en lo relativo a la cuestión religiosa le hizo ver claro cuál había de ser su decisión. En el verano de 1600, se exigió a todos los ciudadanos de Graz que no eran todavía católicos que cambiaran de religión inmediatamente. Kepler fue uno de los sesenta y un ciudadanos prominentes que se negaron a hacerlo, por lo que el 2 de agosto fue cesado en sus cargos, al igual que los sesenta restantes, y le dieron seis semanas y tres días para marcharse del Estado, confiscándole prácticamente todas las pequeñas propiedades que poseía. Kepler escribió a los dos únicos buenos contactos que tenía, Michael Maestlin y Tycho Brahe, pidiéndoles ayuda. La respuesta de Tycho Brahe llegó casi a vuelta de correo, asegurándole que las negociaciones con el emperador marchaban bien y urgiéndole a que se pusiera inmediatamente en camino hacia Praga, con su familia y con los bienes que le permitieran llevarse.

La familia llegó a la hedionda e insalubre ciudad de Praga a mediados de octubre y se alojó en casa del barón Hoffman, pasando allí un invierno durante el cual Johannes y Barbara estuvieron gravemente enfermos con fiebres, mientras su limitada reserva de dinero disminuía rápidamente. Sin haber recibido todavía ningún nombramiento del emperador, en febrero de 1601 los Kepler se mudaron con la familia de Tycho Brahe a una nueva residencia que el emperador Rodolfo había proporcionado al astrónomo. Sus relaciones siguieron siendo difíciles

—Kepler estaba a disgusto por tener que depender de Tycho Brahe y éste se sentía disgustado por lo que consideraba ingratitud por parte de Kepler—. Sin embargo, por fin Kepler fue presentado formalmente al emperador, que le nombró ayudante oficial (¡y remunerado!) de Tycho Brahe, con el cometido de recopilar una nueva serie de tablas de posiciones planetarias, que se llamarían *Tablas Rudolfinas*, en honor del emperador.

Por fin había quedado regularizada la posición de Kepler, aunque Tycho Brahe continuó suministrándole sus datos en una especie de gota a gota, sólo cuando consideraba que Kepler los necesitaba, sin permitirle nunca el libre acceso a toda aquella información. Difícilmente se puede hablar de una relación estrecha y amistosa. Pero, al cabo de poco tiempo, el 13 de octubre, Tycho Brahe cayó enfermo. Después de diez días al borde de la muerte, delirando frecuentemente y de tal forma que se le oyó gritar en más de una ocasión que tenía la esperanza de que no pareciera que había vivido en vano, su mente se volvió lúcida de repente la mañana del 24 de octubre. Mientras su hijo menor y sus discípulos, así como un noble sueco que había llegado de visita y estaba al servicio del rey de Polonia, se reunían todos ellos alrededor de lo que evidentemente iba a ser su lecho de muerte, Tycho Brahe encomendó a Kepler la tarea de terminar las *Tablas Rudolfinas* y le designó como responsable de preservar el enorme tesoro de datos relativos a los planetas —aunque también le urgió a que utilizara estos datos para demostrar que el modelo del mundo que él había construido era el verdadero, y no el de Copérnico. En aquel momento, la mente de Tycho Brahe funcionaba realmente con lucidez, ya que se dio cuenta de que, a pesar de todos los desacuerdos mutuos, Kepler era como matemático el más capaz de todos los que trabajaban con él, siendo por lo tanto la persona que con mayor probabilidad iba a hacer un uso óptimo de los datos, y así iba a garantizar que su vida no había sido en vano. Tycho Brahe murió poco

después de haber confiado el legado de la obra de su vida al asombrado joven que sólo unas semanas antes no había sido más que un pobre refugiado sin un céntimo. El asombro de Kepler debió de ser aún mayor cuando, un par de semanas más tarde, fue nombrado sucesor de Tycho Brahe como matemático imperial de la Corte de Rodolfo II, lo cual implicaba que sería el único responsable de todos los instrumentos de Tycho y también de su obra no publicada. Esta nueva situación contrastaba radicalmente con la primera parte de su vida transcurrida en Alemania. Aunque las cosas tampoco serían fáciles durante los años siguientes y a menudo tendría problemas para cobrar completo el salario que le había acordado el emperador, al menos Kepler podría a largo plazo abordar la tarea de resolver el enigma del movimiento de los planetas.

Durante los años que Kepler pasó en Praga, su trabajo se vería obstaculizado por muchos factores. Sufrió continuas dificultades financieras; hubo interferencias de los herederos de Tycho Brahe, que estaban ansiosos por ver impresas las *Tablas Rudolfinas* y otras publicaciones póstumas de Tycho Brahe (sobre todo por la esperanza de conseguir dinero gracias a los libros) y también se sentían preocupados por la posibilidad de que Kepler distorsionara (desde el punto de vista de estos herederos) los datos de Tycho para dar credibilidad a las teorías copernicanas; y además estaban las funciones que tenía que desempeñar como matemático imperial (lo cual significaba ser el astrólogo imperial), que le hacían perder gran parte de su tiempo en lo que para él era la necia tarea de aconsejar al emperador Rodolfo sobre el significado de los prodigios cósmicos en relación con las perspectivas de guerra con los turcos, las malas cosechas, el desarrollo de los conflictos religiosos, etc. A esto hay que añadir que los cálculos eran en sí mismos laboriosos y era preciso revisarlos una y otra vez para detectar y corregir errores aritméticos —las páginas de cálculos interminables que

se han conservado están llenas todas ellas de cálculos aritméticos relativos a las órbitas de los planetas, una tarea que resulta casi inimaginable en esta época de calculadoras de bolsillo y ordenadores portátiles.

Nuevas ideas sobre el movimiento de los planetas: primera y segunda ley de Kepler

No es sorprendente que llevara años resolver el enigma de la órbita de Marte, dado que Kepler tuvo que ir alejándose paso a paso de la idea de órbita circular perfecta centrada en el Sol. En primer lugar intentó la posibilidad de una órbita descentrada, aunque seguía siendo circular, de tal modo que Marte se encontraba en una mitad de su órbita más cerca del Sol que en la otra mitad —esto encajaba hasta cierto punto con el descubrimiento de que Marte se movía más rápido en una mitad de su órbita (la que estaba más cerca del Sol)—. En un momento dado. Kepler hizo alga que actualmente puede parecemos obvio, pero que entonces tuvo una importancia enorme: realizó algunos de sus cálculos desde la perspectiva de un observador situado en Marte y que contempla desde allí la órbita de la Tierra —un enorme salto conceptual que hace presagiar la idea de que todo movimiento es relativo—. En 1602 cuando aún estaba trabajando con su idea de una órbita circular «excéntrica», Kepler descubrió lo que actualmente se conoce como su segunda ley: una línea imaginaria (*radio vector*) que une el Sol con un planeta que se mueve en su órbita alrededor de él barre áreas iguales en tiempos iguales. Es un modo preciso de expresar que un planeta se mueve más rápido cuando está más cerca del Sol, ya que el radio vector más corto ha de barrer un ángulo mayor para cubrir la misma área que barre un radio vector más largo cuando se mueve recorriendo un ángulo menor. Fue justo después de este descubrimiento cuando Kepler se dio cuenta (tras intentar

otras posibilidades) de que la forma de las órbitas era en realidad elíptica, y en 1605, cuando otro trabajo le distrajo de esta tarea, descubrió lo que actualmente conocemos como primera ley de Kepler, según la cual cada planeta se mueve con su propia órbita elíptica alrededor del Sol, estando éste situado en uno de los dos focos de la elipse (el mismo foco para cada una de las trayectorias). Con estas dos leyes, Kepler había descartado la necesidad de los epiciclos, los ecuantes y todo el complicado bagaje de los modelos anteriores del universo, incluida su propia teoría mística de los sólidos geométricos encajados (aunque él nunca aceptó esto).

A pesar de la difusión que alcanzaron las noticias relativas a los descubrimientos de Kepler, la exposición completa de sus teorías no apareció impresa hasta que se publicó el libro titulado *Astronomía Nova* en 1609 —la publicación se retrasó por problemas con la imprenta y falta de medios de financiación—. Sin embargo, aunque podríamos imaginamos exactamente lo contrario, ni siquiera la publicación del libro produjo la aclamación inmediata por parte de sus contemporáneos. A nadie le gustaba la idea de que las órbitas fueran elípticas (muchos aún no habían aceptado que la Tierra no estuviera en el centro del universo), y sólo un matemático experimentado habría podido apreciar que el modelo de Kepler no era meramente un fruto más del pensamiento místico (como sus sólidos geométricos encajados, o como el modelo de Tycho Brahe), sino que estaba basado coherentemente en hechos comprobados mediante la observación. En realidad, no resulta sorprendente el hecho de que Kepler no lograra alcanzar el nivel que merecía a los ojos de los historiadores hasta que un matemático como Isaac Newton utilizó sus leyes en combinación con su propia teoría de la gravedad para explicar cómo se movían los planetas en órbitas elípticas. De hecho, en su propia época, Kepler fue más famoso como astrólogo que como astrónomo, aunque la diferencia en-

tre ambas cosas era por aquel entonces bastante confusa. Para ilustrar esta situación, basta examinar lo que sucedió una de las veces en que se distrajo de su trabajo sobre los planetas. Esto sucedió en 1604, cuando otra «nueva» estrella, tan brillante como el planeta Júpiter, apareció en el cielo durante el verano y siguió siendo visible a simple vista hasta bien entrado el año 1606. Para la mayoría de la gente se trataba de un acontecimiento de la mayor importancia en el campo de la astrología, y Kepler, dado que esto formaba parte de sus funciones como matemático imperial, tenía que interpretar su significado. Aunque esto no afectaba a las implicaciones que podía tener el suceso en su informe para el emperador, Kepler se arriesgó a decir que, a pesar de su brillo, aquella estrella debía estar situada a la misma distancia que las demás estrellas, es decir, que no era un fenómeno que se produjera en la zona del universo ocupada por los planetas. Lo mismo que Tycho Brahe en una ocasión anterior, Kepler consideró que aquella supernova ponía en duda el concepto aristotélico de estrellas literalmente fijas y eternas.

No todas las tareas que «distraían» a Kepler de sus trabajos sobre los planetas carecían de importancia científica. En 1604 publicó también un libro sobre óptica, analizando el modo en que el ojo funciona mediante la refracción de los rayos luminosos que entran en la pupila para enfocarlos hacia la retina, de tal modo que todos los rayos procedentes de un punto concreto de un objeto iluminado se concentran en un punto único sobre la retina. Luego utilizó esta teoría para explicar que algunas personas tenían una mala capacidad visual (un tema que ciertamente le tocaba de cerca) debida a que las imperfecciones del ojo hacían que los rayos se centraran en un punto situado delante o detrás de la retina, y a continuación explicó cómo funcionaban las lentes para corregir estos defectos, algo que hasta entonces nadie había comprendido, aunque las lentes se habían

estado utilizando desde hacía más de 300 años de forma empírica. Después de que Galileo comenzara a utilizar el telescopio en la astronomía y se difundieran las noticias relativas a sus descubrimientos, Kepler desarrolló sus teorías ópticas para explicar cómo funcionaba el telescopio. Sus intereses científicos no siempre estaban en las esferas celestes, sino que también podían referirse a cuestiones terrenales.

En los años que siguieron a la observación de la supernova se produjo un deterioro en la situación política y religiosa de Centroeuropa, concretamente cuando los grupos religiosos rivales constituyeron alianzas políticas que se involucrarían posteriormente en la guerra de los Treinta Años. Aparte del impacto que tuvo en la vida de Kepler, este conflicto incidió en la historia de la ciencia, ya que la agitación en Centroeuropa, junto con la prohibición de las teorías de Galileo por parte de la Iglesia Católica, fueron factores que contribuyeron a atrofiar el desarrollo de las teorías científicas en la región y a que el florecimiento plenos de la semilla que Kepler había plantado tuviera lugar en Inglaterra, donde, a pesar de la guerra civil, hubo un ambiente académico más sosegado en el que personas como Newton pudieron realizar su trabajo.

En 1608, varios estados protestantes se unieron formando la Unión Protestante, mientras que sus rivales constituyeron durante el año siguiente la Liga Católica. El emperador Rodolfo se encontraba entonces en una situación de «semireclusión», obsesionado por sus tesoros artísticos, y su comportamiento era francamente excéntrico, aunque quizá se podría decir que estaba completamente loco. Incluso en tiempos de paz, el emperador no se encontraba en condiciones de gobernar de manera efectiva el Sacro Imperio Romano (aunque, de hecho, ningún emperador consiguió realmente gobernar un conjunto de estados tan dispares), se había arruinado económicamente y el poder fue pasando gradualmente a manos de su hermano Matías,

que se convirtió en emperador cuando falleció Rodolfo en 1612. Kepler llevaba ya tiempo viendo hacia dónde soplaba el viento, por lo que intentó conseguir un nombramiento en su antigua universidad, es decir, en Tubinga, pero fue rechazado por lo poco ortodoxas que eran sus creencias religiosas. Al mismo tiempo, surgieron dificultades en su familia. En 1611, Barbara enfermó de epilepsia y uno de sus tres hijos murió de viruela. Ansioso por marcharse de Praga antes de que en el plano político se hundiera todo, Kepler viajó a Linz, donde solicitó un empleo como matemático del distrito y fue admitido en junio. Sin embargo, al volver apresuradamente a Praga para arreglar el traslado, se encontró con que su mujer estaba de nuevo gravemente enferma. Falleció de tifus unos pocos días después del regreso de Kepler. Deprimido y lleno de inseguridad con respecto a su futuro, se quedó en Praga hasta la muerte del emperador Rodolfo y entonces, para sorpresa suya, el nuevo emperador, Matías, le confirmó en el cargo de matemático imperial, le ofreció un salario anual (aunque Kepler no vio nunca mucho de este dinero), pero le dio permiso para acudir a Linz y tomar también posesión de su cargo allí. Kepler dejó por el momento a los hijos que le quedaban con unos amigos y partió de viaje una vez más, cuando todavía tenía sólo 40 años de edad.

Sin embargo, también en Linz continuaron sus problemas. Aquella zona de Estiria estaba dominada con mano de hierro por un sector extremadamente ortodoxo de la Iglesia luterana; el miembro principal del clero era un hombre de Tubinga que conocía los puntos de vista heterodoxos de Kepler y se negó a que éste recibiera la comunión, lo cual causó a Kepler una enorme aflicción, ya que era un hombre profundamente religioso, aunque a su peculiar manera. Los insistentes llamamientos de las autoridades eclesiásticas no lograron resolver esta situación, pero le quitaron a Kepler un tiempo precioso que podría haber invertido en sus trabajos sobre los planetas. También

tenía que atender a sus deberes como matemático del distrito y además no tardó en volver a contraer matrimonio, esta vez con una joven de 24 años con la que tuvo seis hijos, tres de los cuales murieron en la infancia. Kepler también llevó a cabo investigaciones de otro tipo, relacionadas con la religión, basándose en los datos de un eclipse de Luna que ocurrió en tiempos de Herodes para demostrar que Jesús nació realmente el año 5 a. C., y participó en la reforma del calendario (en 1582 el papa Gregorio XIII había implantado el calendario moderno, pero muchos estados de la Europa protestante se mostraban reacios a introducir el cambio). Sin embargo, lo que más distrajo a Kepler de su trabajo sucedió durante los años siguientes a 1615, cuando su madre fue acusada de brujería. Para situar la gravedad de este hecho en una perspectiva histórica, hay que decir que aquel mismo año seis supuestas brujas fueron quemadas en Leonberg, la ciudad donde vivía entonces la madre de Kepler. No era una situación que Kepler pudiera ignorar,[9] por lo que durante los años siguientes realizó repetidos viajes a Leonberg y, durante todo el tiempo en que su madre estuvo amenazada por la posibilidad de un juicio, no cesó de presentar peticiones a las autoridades en nombre de ella. En agosto de 1620, la anciana fue finalmente arrestada e ingresó en prisión. Posteriormente, durante el mismo año, fue juzgada, pero los jueces consideraron que las pruebas eran insuficientes para condenarla, aunque bastaban para suscitar dudas. Estuvo en prisión hasta que en octubre de 1621 se consideró que ya había sufrido bastante y fue puesta en libertad. Murió seis meses más tarde.

La tercera ley de Kepler

A la vista de estos problemas personales y de lo problemática que fue toda su vida privada en general, resulta paradójico que una de las últimas grandes obras de Kepler se titule *Harmonice*

Mundi (*La armonía del mundo*), aunque, por supuesto, este título se refiere al mundo de los planetas, y no exclusivamente al problemático planeta Tierra. Es en este libro (que en su mayor parte tiene un tono místico y es una obra de escasa importancia científica) donde explica cómo se le ocurrió, el 8 de marzo de 1618, la idea que ha llegado a denominarse tercera ley de Kepler y cómo la dejó completamente perfilada posteriormente durante aquel mismo año. Esta ley relaciona el tiempo que tarda un planeta en dar una vuelta completa alrededor del Sol (su período o año) con su distancia a dicho astro, y lo hace de una forma muy precisa, cuantificando el modelo general que había descubierto Copérnico. La ley dice que los cuadrados de los períodos de dos planetas cualesquiera son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol. Por ejemplo, la distancia (utilizando mediciones modernas) de Marte al Sol es 1,52 veces la distancia de la Tierra al Sol, y $1{,}52^3$ es igual a 3,51. Por otra parte, la duración del «año» en Marte es 1,88 veces la duración del año en la Tierra, siendo $1{,}88^2$ igual a 3,53 (los números no coinciden totalmente porque los he redondeado con dos cifras decimales).

PUBLICACIÓN DE LAS TABLAS PLANETARIAS LLAMADAS *TABLAS RUDOLFINAS*

Harmonice Mundi se publicó en 1619, cuando la guerra de los Treinta Años estaba en pleno apogeo. Debido a las dificultades ocasionadas por la guerra y al juicio por brujería en que se vio involucrada su madre, la otra gran obra que Kepler publicó por esta época, su *Epítome de la astronomía copernicana*, se editó en tres volúmenes que aparecieron en 1618, 1620 y 1621. Al mismo tiempo que defendía audazmente el universo centrado en el Sol tal como lo había descrito Copérnico, este libro, por ser más accesible, llevó las teorías de Kepler a un público lector

más amplio y, en cierto modo, puso el colofón a sus grandes contribuciones a la astronomía. Sin embargo, había un cometido muy importante que todavía quedaba pendiente de realización. En gran medida gracias a la invención de los logaritmos, de la que fue autor John Napier (1550-1617) en Inglaterra, que se había publicado recientemente y fue de gran utilidad para facilitarle a Kepler los pesados cálculos aritméticos, pudieron publicarse finalmente en 1627 las *Tablas Rudolfinas* (una publicación que se vio retrasada una y otra vez por la guerra, los disturbios e incluso el asedio de la ciudad de Linz), quedando así totalmente cumplidas las obligaciones de Kepler con el Sacro Imperio Romano. Estas tablas hicieron posible el cálculo de las posiciones de los planetas con una precisión treinta veces mayor que la de las tablas que había confeccionado Copérnico y fueron las que se utilizaron habitualmente durante generaciones. Su valor se puso de manifiesto en 1631 cuando el astrónomo francés Pierre Gassendi observó un tránsito de Mercurio (el momento en que Mercurio pasa por delante del Sol) que Kepler había predicho utilizando las nuevas tablas. Esta fue la primera vez que se observó un tránsito de Mercurio.

La impresión de sus obras no fue lo único que la guerra interrumpió en la vida de Kepler. En 1619, Fernando II se había convertido en emperador tras la muerte de Matías, y este Fernando era el mismo católico ferviente que había causado tantas aflicciones a Kepler en Estiria en un momento anterior de su carrera. Después de que su propia Iglesia luterana le había perseguido en Linz por no ser suficientemente ortodoxo, ahora era perseguido por ser demasiado luterano, ya que a partir de 1625 la cambiante situación política que se vivió con Fernando II trajo el dominio de los católicos a toda Austria. Kepler no tenía ya ninguna posibilidad de conservar su cargo en la Corte, salvo que se convirtiera al catolicismo, pero esto no entraba aún en sus planes (aunque parece ser que Fernando II estaba

predispuesto personalmente a favor de Kepler y le habría agradado retenerlo en Praga, si éste se hubiera prestado, siquiera de forma hipócrita, a tal conversión). En 1628, Kepler consiguió asegurarse un cargo con el duque de Wallenstein, un hombre que toleraba todas las formas de culto religioso (siempre que fueran cristianas) y que nunca dio un paso sin consultar a sus astrólogos. Conocía a Kepler desde su época en Praga, cuando le había hecho un horóscopo que, a los ojos del duque, había resultado notablemente preciso en sus profecías. Wallenstein parecía ser un benefactor y protector ideal, un hombre poderoso entre cuyos cargos estaba el de jefe supremo del ejército de Fernando II.

La muerte de Kepler

En julio de 1628, la familia Kepler llegó a la ciudad de Sagan, en Silesia, para comenzar una nueva vida. Lo mejor del nuevo empleo de Kepler era que le pagaban con regularidad. El hecho más curioso es que tuvo tiempo para escribir uno de los primeros relatos de ciencia ficción, *El sueño de la Luna*. La mayor desdicha fue que, poco después de que Kepler llegara allí, el duque de Wallenstein decidió implicarse en la Contrarreforma para ganar los favores del emperador. Aunque Kepler, como empleado del duque, estaba exento de cumplir las nuevas leyes que se promulgaron entonces, pudo ver una vez más a sus vecinos protestantes arruinados y viviendo con temor. A pesar de sus esfuerzos para complacer al emperador, en el verano de 1630 Wallenstein cayó en desgracia y fue despedido de su cargo de jefe supremo del ejército. Una vez más, el futuro de Kepler parecía incierto, por lo que tuvo necesidad de recurrir a todos sus recursos para no verse forzado a emigrar de nuevo. Durante algún tiempo había estado intentando que llegara a sus manos cierta cantidad de dinero que se le debía en Linz y fue citado a

comparecer ante las autoridades para resolver el asunto. En octubre partió de Sagan para acudir a esta comparecencia y viajó despacio, pasando por Leipzig y Nüremberg, para llegar a Ratisbona el 2 de noviembre. Allí contrajo unas fiebres y tuvo que guardar cama. El 15 de noviembre de 1630, cuando le faltaban unas pocas semanas para cumplir cincuenta nueve años, Kepler murió. Fue un hombre de su tiempo, que mantenía un cierto equilibrio entre el misticismo del pasado (que influyó en sus ideas sobre el universo) y la ciencia lógica del futuro, pero cuya gran talla como voz de la razón destacó aún más en el contexto de un mundo donde los príncipes y los emperadores dependían aún de los pronósticos que les hacían los astrólogos, y en el que su propia madre fue juzgada como sospechosa de brujería. Al mismo tiempo que Kepler realizaba su gran obra, más al sur, en Italia, se oía aún más poderosa la voz de la razón científica, en un país en el que, aunque había tanta superstición y persecución religiosa como en Centroeuropa, al menos existía una cierta estabilidad y la persecución provenía siempre de la misma Iglesia.

Capítulo 3

LOS PRIMEROS CIENTÍFICOS

WILLIAM GILBERT Y EL MAGNETISMO

No existe un momento determinado de la historia del que se pueda decir que fue precisamente entonces cuando se produjo la sustitución del misticismo por la ciencia como medio de explicar el funcionamiento del mundo. Sin embargo, hay dos hombres cuyas vidas circunscriben claramente esta transición, que se produce (al menos para ellos) aproximadamente en el cambio del siglo XVI al XVII. Desde luego, posteriormente también hubo científicos con inclinaciones místicas, entre los cuales (como ya hemos visto) está incluida una figura científica tan eminente como Johannes Kepler, y (como veremos en breve) los alquimistas. Sin embargo, después de la primera década del siglo XVII, el método científico basado en la comparación de las hipótesis con los experimentos y la observación para separar el trigo de la paja había quedado claramente expresado en la obra de William Gilbert en Inglaterra y en la de Galileo Galilei en Italia, y allí estaba como un ejemplo a seguir por aquellos que tuvieran ojos para ver.

Aunque Galileo es una de las figuras punteras de la ciencia, cuyo nombre resulta conocido actualmente para cualquier persona con un nivel cultural medio, y Gilbert es menos famoso de lo que se merece, la fecha de nacimiento de este último es anterior y, al menos cronológicamente, es acreedor al título de pri-

mer científico. William Gilbert es el nombre por el que se le conoce en los libros de historia, aunque su propia familia utilizaba la forma preferida en la época y escribía su apellido como Gilberd. Nació el 24 de mayo de 1544[1] en Colchester, en el condado de Essex, en el seno de una familia importante en la localidad —su padre, Jerome Gilberd, era secretario del registro civil, un cargo importante en el gobierno local—. William tenía una cómoda posición en una sociedad bien organizada y no pasó en ningún caso por las difíciles situaciones que tuvo que sufrir Kepler; estudió en el instituto local y posteriormente fue a Cambridge en 1558. Se sabe muy poco sobre los primeros años de su vida, pero algunas informaciones apuntan a que también estudió en Oxford, aunque esto no se ha podido comprobar en ningún registro oficial. Terminó su licenciatura de humanidades en 1560 y se convirtió en miembro del consejo de gobierno de su propio *college* (el de St. John), adquiriendo en 1564 el grado de doctor en humanidades y en 1569 el de doctor en Medicina. Posteriormente estuvo viajando por el continente durante varios años, hasta que se estableció en Londres, donde llegó a ser miembro de la junta de gobierno del Royal College of Physicians en 1573.

Gilbert fue un médico eminente que tuvo un éxito extraordinario y fue ocupando uno tras otro casi todos los cargos del Royal College, siendo elegido finalmente presidente en 1599. Al año siguiente, le fue otorgado el cargo de médico personal de la reina Isabel I, la cual posteriormente le nombró caballero. Cuando esta reina murió, en mayo de 1603, Gilbert fue nombrado médico personal por su sucesor, Jacobo I, que, como Jacobo VI de Escocia, había viajado a Dinamarca para buscar esposa y había conocido a Tycho Brahe durante su estancia allí. Pero Gilbert sobrevivió a Isabel I sólo durante unos pocos meses, falleciendo el 10 de diciembre de 1603. A pesar de su fama como médico, Gilbert realizó sus mejores contribuciones cien-

tíficas en el campo de la física a través de sus meticulosas investigaciones sobre la naturaleza del magnetismo.

Estas investigaciones no fueron realmente otra cosa que la labor de un caballero aficionado, un hombre lo suficientemente adinerado como para haber gastado, según informes de la época, alrededor de 5000 libras de su fortuna personal en sus trabajos científicos durante los treinta años siguientes a su asentamiento en Londres[2]. Al principio, se interesó por la química, pero pronto (tras convencerse de que la creencia en la transmutación de los metales, vigente entonces en la alquimia, era una fantasía) cambió sus objetivos al estudio de la electricidad y el magnetismo, unos fenómenos naturales cuyo estudio se había descuidado esencialmente desde las investigaciones (o, más bien, especulaciones) llevadas a cabo por los filósofos griegos 2000 años antes. Estos trabajos culminaron en 1600, tras unos dieciocho años de estudio, con la publicación de un gran libro titulado *De Magnete Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure (Sobre el magnetismo, los cuerpos magnéticos y el gran imán que es la Tierra)* y conocido habitualmente como *De Magnete*. Este libro fue la primera obra importante que se elaboró en Inglaterra en el campo de las ciencias físicas.

La obra de Gilbert fue amplia y minuciosa. Mediante sus experimentos demostró la falsedad de muchas antiguas creencias místicas relativas al magnetismo —tales como la idea de que la magnetita, un mineral magnético que se encuentra en la naturaleza, podía curar los dolores de cabeza, y la creencia de que un imán podía ser desactivado frotándolo con ajo— e inventó la técnica de magnetizar trozos de metal utilizando la magnetita. Descubrió las leyes de la atracción y la repulsión magnéticas que nos resultan tan familiares por haberlas aprendido siendo escolares, demostró que la Tierra misma actúa como una gigantesca barra imantada, y dio los nombres de «polo norte» y «polo sur» a las dos extremidades de una barra imantada. Sus

investigaciones fueron tan minuciosas y completas que durante dos siglos después de Gilbert nada se añadió al conocimiento científico del magnetismo, hasta el descubrimiento del electromagnetismo en la década de 1820 y los subsiguientes trabajos de Michael Faraday. El ámbito de los intereses de Gilbert llegó también a incluir la cuestión de los cielos, aunque necesariamente de una forma más especulativa. Fue un defensor del modelo copernicano del universo, en parte porque pensó que los planetas podían estar sujetos a recorrer sus órbitas por efecto del magnetismo (una idea que influyó en Kepler). Sin embargo, la originalidad de Gilbert brilló también en sus comentarios sobre la astronomía de Copérnico, con respecto a la cual señaló lo fácil que es explicar la precesión de los equinoccios (un fenómeno por el cual el punto del cielo en que el Sol cruza el ecuador celeste en primavera y en otoño parece desplazarse lentamente hacia el oeste a medida que transcurren los siglos) considerando la oscilación de la Tierra al girar en torno a sí misma (como la oscilación de una peonza), y lo difícil que es explicar el fenómeno si se mantiene la teoría de las esferas de cristal centradas en la Tierra (una explicación que requiere verdaderamente unas complicaciones tremendas en las que no vamos a entrar ahora). También sugirió que las estrellas están situadas con respecto a la Tierra a distancias diferentes (no todas situadas sobre una esfera de cristal) y que podrían ser cuerpos celestes similares al Sol rodeados por las órbitas de sus propios planetas habitables. Su investigación sobre la electricidad estática, producida frotando con seda objetos hechos de sustancias como el ámbar o el cristal, fue menos completa que su estudio sobre el magnetismo, pero Gilbert descubrió que existía una diferencia entre la electricidad y el magnetismo (de hecho, acuñó la palabra *eléctrico* en este contexto), aunque habría que esperar todavía hasta la década de 1730, para que el físico francés Charles Du Fay (1698-1739) descubriera que existen dos clases

de carga eléctrica, llamadas «positiva» y «negativa», que se comportan en cierto modo como polos magnéticos, por el hecho de que las cargas del mismo tipo se repelen entre sí, mientras que las cargas opuestas se atraen la una a la otra.

No obstante, la característica más importante de *De Magnete* no fue lo que Gilbert había descubierto, sino cómo lo había descubierto, y la manera tan clara en que explicó su método científico como un ejemplo que otros podrían seguir. *De Magnete* ejerció una influencia directa sobre Galileo, que se inspiró en este libro para llevar a cabo sus propias investigaciones sobre magnetismo y que se refirió a Gilbert calificándole como fundador del método científico experimental. Justo al principio del prólogo de su libro, Gilbert expone su criterio científico: «En el descubrimiento de cosas secretas y en la investigación de causas ocultas, se obtienen razones más poderosas mediante experimentos seguros y argumentos demostrados, que a partir de conjeturas probables y de opiniones de especuladores filosóficos».[3] Llevando a la práctica su teoría, Gilbert continúa, dando la descripción de sus experimentos con todo detalle, de tal forma que cualquier lector mínimamente hábil puede reproducir dichos experimentos por su cuenta, y así explica el poder que tiene su planteamiento:

> Del mismo modo que la geometría se alza sobre fundamentos seguros, entendidos rápidamente y con facilidad, por los que la mente ingeniosa asciende hasta llegar por encima del éter, así sucede también con nuestra doctrina y ciencia del magnetismo, que, en el orden debido, muestra primero ciertos hechos cuya presencia no es tan rara; a partir de éstos se generan otros más extraordinarios; a largo plazo, como en serie, se van revelando las cosas más secretas y ocultas de la Tierra, y las causas se reconocen a partir de factores que, en la ignorancia de los antiguos o por descuido de los modernos, no habían sido percibidos o se habían pasado por alto.

Y así, entre muchas digresiones en las que censura a aquellos filósofos que «discursean… basándose en unos pocos experimentos vagos y no concluyentes», Gilbert exclama «qué fácil es

cometer equivocaciones y errores en ausencia de experimentos fiables», y urge a sus lectores «quienesquiera que tengan intención de realizar los mismos experimentos», a «manejar los objetos con cuidado, con destreza y habilidad, no con descuido o con torpeza; cuando un experimento fracasa, no permitamos que en su ignorancia condenen nuestros descubrimientos, porque no hay nada en estos libros que no haya sido investigado, y realizado una y otra vez, y repetido ante nuestros ojos».

Esto tuvo que sonar como música celestial en los oídos de Galileo, cuando éste leyó las palabras de Gilbert, porque, incluso dejando a un lado la importancia de los descubrimientos que hizo, la contribución fundamental de Galileo al nacimiento de la ciencia consiste precisamente en el énfasis que puso en la necesidad de realizar experimentos precisos y reiterados para comprobar las hipótesis, y no confiar en el viejo planteamiento «filosófico» de intentar comprender el funcionamiento del mundo utilizando sólo la lógica pura y la razón —el planteamiento que había conducido a creer que una piedra de mayor peso caería a mayor velocidad que otra más ligera, sin que nadie se preocupara de comprobar esta hipótesis mediante el sencillo experimento de dejar caer pares de piedras para ver qué sucedía—. Por su hábito de pasear por el campus de una gran universidad o por las calles de la ciudad mientras discutían sobre estos temas, la vieja escuela de filosofía «científica» recibió el nombre de escuela peripatética[4]. Al igual que Gilbert, Galileo puso en práctica lo que predicaba, y así su obra desterró el planteamiento peripatético de la Italia de finales del siglo XVI y principios del XVII.

Galileo y sus trabajos sobre el péndulo, la gravedad y la aceleración

Galileo Galilei nació en Pisa el 15 de febrero de 1564, el mismo año en que nació William Shakespeare y el mismo mes en que murió Miguel Angel. La repetición que aparece en su nombre se debió a que un antepasado suyo del siglo XV llamado Galileo Bonaiuti llegó a ser una personalidad tan importante socialmente como médico y magistrado eminente, que la familia cambió de apellido, pasando a llamarse Galilei en honor de dicho personaje. A «nuestro» Galileo le dieron además el nombre de pila de su antepasado, dándose la paradoja de que aquel Galileo Bonaiuti, que en su tiempo fue tan famoso, es recordado ahora únicamente por haber sido un antepasado de Galileo Galilei. En la época en que nació Galileo, la familia tenía buenos contactos y una posición respetable dentro de la sociedad, pero siempre sería un problema para ellos encontrar el dinero necesario para mantener esa posición. El padre de Galileo, Vincenzio, que había nacido en Florencia en 1520, fue un consumado músico profesional que estaba profundamente interesado por las matemáticas y la teoría de la música. Contrajo matrimonio con una joven llamada Giulia en 1562 y Galileo fue el mayor de sus siete hijos, de los cuales tres murieron probablemente en la infancia. Los hermanos supervivientes eran Virginia, nacida en 1573, Michelangelo (1575) y Livia (1587), siendo Galileo el mayor de todos ellos. Tras la muerte de su padre, se convirtió en el cabeza de familia, lo cual le iba a ocasionar no pocas preocupaciones.

Pero aún faltaba mucho para esto en 1572, cuando Vincenzio decidió regresar a Florencia, llevando a Giulia con él, pero dejando a Galileo con unos parientes en Pisa durante dos años, mientras él se establecía de nuevo en su ciudad natal. Era la época en que toda la región de Toscana, y Florencia y Pisa en particular, florecía en el Renacimiento. La región estaba gobernada por el duque de Florencia, Cosimo de Medici, que también había sido nombrado duque de Toscana por el Papa en

1570 como agradecimiento por su participación en las victoriosas campañas militares contra los moros. En Florencia, la capital de Toscana, Vincenzio llegó a ser músico de la Corte y su familia se relacionó con duques y príncipes en el corazón artístico e intelectual de aquella Europa renacida.

Hasta la edad de 11 años, Galileo fue educado en su propio hogar, en gran medida por su padre, pero con la ayuda de un tutor ocasional. Se convirtió en un músico excelente por derecho propio, pero en lo relativo a la profesión, nunca siguió los pasos de su padre, y durante toda su vida tocó (sobre todo el laúd) únicamente por placer. Para lo que se estilaba en la época, Vincenzio fue una especie de librepensador y no sentía un gran amor por las formas y los rituales de la Iglesia. Sin embargo, en 1575, cuando llegó el momento de enviar a Galileo fuera del hogar, para que recibiese una educación más formal, el lugar a donde obviamente se le podía enviar, sólo por razones educativas, era un monasterio. Vincenzio eligió uno situado en Vallombrosa, a unos 30 kilómetros al este de Florencia. Como ya les había sucedido a muchos jóvenes antes que a él, y les sucedería a otros muchos en el futuro, Galileo se enamoró del estilo de vida monástico y a la edad de 15 años ingresó en la orden como novicio. Su padre estaba horrorizado y, cuando el muchacho desarrolló una infección ocular, lo sacó rápidamente del monasterio y lo llevó a Florencia para que lo viera un médico. Sus ojos se recuperaron, pero Galileo no volvió nunca más al monasterio y no se volvió a hablar de la posibilidad de que se hiciera monje. Aunque su educación continuó en Florencia durante dos años más bajo la supervisión de unos monjes de la misma orden que los de Vallombrosa, Galileo vivió en la casa familiar bajo la mirada atenta de su padre. En los registros de la abadía de Vallombrosa, Galileo Galilei quedó inscrito oficialmente como un sacerdote al que se obligó a colgar los hábitos.

Aunque Vincenzio había logrado ganarse la vida como músico, era consciente de que esta vocación resultaba insegura e hizo planes para que su hijo mayor se estableciera con una carrera respetable y económicamente rentable. ¿Qué podía ser mejor que conseguir que adquiriera una formación como médico, igual que su ilustre homónimo? En 1581, a los 17 años de edad, Galileo se matriculó como estudiante de medicina en la Universidad de Pisa, donde vivió con los mismos parientes de su madre que le habían cuidado a principios de la década de 1570. Galileo fue un estudiante argumentador y que cuestionaba sin miedo la sabiduría (en gran medida aristotélica) heredada en aquella época. Se hizo famoso entre los estudiantes, recibiendo el apodo de «*el pendenciero*» por su amor a la discusión y, en años posteriores de su vida, cuando miraba hacia atrás, recordaba cómo se le había ocurrido inmediatamente un modo de refutar la idea aristotélica, conservada religiosamente en la enseñanza peripatética, según la cual objetos de distinto peso caían a velocidades diferentes. Las bolas del granizo, a pesar de tener tamaños diferentes, llegaban al suelo al mismo tiempo. En el supuesto de que Aristóteles tuviera razón, las bolas de granizo más pesadas se formarían en nubes más altas que aquellas de las que procedían las bolas más ligeras —exactamente a una distancia mayor hacia arriba, tal que, cayendo a mayor velocidad, llegaran al suelo junto con las bolas de granizo más ligeras generadas a alturas menores—. A Galileo esto le parecía bastante improbable; en consecuencia, se complació en dar a sus compañeros y profesores de la universidad una explicación mucho más sencilla, según la cual todas las bolas de granizo se producían en el mismo lugar dentro de una nube, por lo que caían todas juntas a la misma velocidad, independientemente de su peso.

Este tipo de argumentación era para Galileo simplemente una distracción al margen de los estudios de medicina, aunque,

de todas formas, no se puede decir que se dedicara a estos estudios con un gran entusiasmo. Sin embargo, a principios de 1583, se desvanecieron todas las perspectivas de terminar la carrera de medicina. Durante aquellos meses de invierno, la Corte del gran duque de Toscana estableció su residencia de forma continua en Pisa, desde Navidad hasta la Pascua. Gracias a los contactos que, a través de su padre, tenía en aquel ambiente, Galileo trató socialmente a Ostilio Ricci, el matemático de la Corte y a principios de 1583 fue a visitar a su nuevo amigo, justo cuando Ricci estaba dando una clase de matemáticas a algunos estudiantes. En vez de marcharse y volver más tarde, Galileo se sentó a escuchar la clase y quedó fascinado por el tema —fue su primer encuentro con las matemáticas propiamente dichas, ya que hasta entonces sólo había conocido la aritmética—. Se unió de manera no oficial a los alumnos de Ricci y comenzó a estudiar geometría euclídea en vez de dedicarse a los libros de texto de medicina. Ricci se dio cuenta de que Galileo tenía aptitudes para la materia y le dio su apoyo cuando éste pidió permiso a Vincenzio para cambiar sus estudios de medicina por los de matemáticas. Vincenzio se negó, alegando motivos aparentemente razonables, como el hecho de que había muchos puestos para colocarse como médico, pero muy pocos para los matemáticos. De todos modos, Galileo continuó estudiando matemáticas, ignorando ampliamente los estudios de medicina, por lo que, cuando se fue de Pisa en 1585, no tenía ningún título y volvió a Florencia para intentar ganarse la vida a duras penas como profesor particular de matemáticas y filosofía natural.

Otro suceso curioso tuvo lugar mientras Galileo era estudiante de medicina en Pisa, aunque se cree que esta historia ha sido distorsionada y embellecida a lo largo de los siglos. Parece ser, casi con toda seguridad, que Galileo quedó hipnotizado por el balanceo lento y continuo de una lámpara de brazos durante

un sermón bastante tedioso que escuchó en la catedral, y que, como no tenía nada mejor que hacer, se dedicó, utilizando los latidos de su propio pulso, a cronometrar la oscilación de este péndulo a medida que el arco recorrido por la lámpara se iba acortando. Este pasatiempo le hizo descubrir que el péndulo siempre tardaba el mismo tiempo en realizar una oscilación completa, tanto si oscilaba recorriendo un arco corto, como si lo hacía recorriendo un arco largo. Según esta leyenda, Galileo se fue rápidamente a su casa para realizar varios experimentos con péndulos de distintas longitudes, y así inventó en el acto el reloj del abuelo (como otras leyendas sobre Galileo, esta historia le debe mucho a los escritos de Vincenzo Viviani, un joven que mucho más tarde, cuando el anciano Galileo se quedó ciego, se convirtió en su escribiente y devoto discípulo, y se exaltaba a menudo contando los grandes momentos de la vida de su maestro). En realidad, la idea del péndulo estuvo siempre como un asunto pendiente en la mente de Galileo hasta 1602, cuando por fin realizó unos meticulosos experimentos y quedó comprobado que el período de oscilación de un péndulo depende exclusivamente de su longitud, y no de su peso ni de la longitud del arco que recorre al oscilar. Pero sí es cierto que la semilla de esta teoría fue introducida en su mente en la catedral de Pisa en 1584 o 1585.

Aunque Galileo comenzó en Florencia adquiriendo fama como filósofo natural, realizando experimentos y haciendo anotaciones que luego serían desarrolladas en sus importantes escritos científicos, sin embargo, durante los cuatro años siguientes, no pasó de ganar lo justo para vivir. Al no disponer de medios económicos propios, la única forma en que podía tener una cierta seguridad para realizar su trabajo científico era encontrar un mecenas influyente. La salvación de Galileo fue el marqués Guidobaldo del Monte, un aristócrata que había escrito un libro importante sobre mecánica y estaba profundamente

interesado por la ciencia. Fue en parte gracias a la influencia de Del Monte que, en 1589, sólo cuatro años después de haber abandonado la Universidad de Pisa sin obtener título alguno, Galileo volvió a esa misma universidad como catedrático de matemáticas, con un contrato de tres años. Aunque el nombre de este cargo sonaba muy bien, se trataba sólo de un primer paso muy modesto en el escalafón académico. Como sin duda le diría Vincenzio Galilei en alguna ocasión a su hijo, por aquel entonces el catedrático de medicina cobraba en Pisa un salario de 2000 coronas al año, mientras que el catedrático de matemáticas tenía que arreglárselas con 60 coronas. Galileo se veía obligado a completar sus ingresos aceptando estudiantes que vivían con él y tenían la ventaja de disfrutar de sus enseñanzas y su influencia más o menos a tiempo completo, no sólo en las horas de clase. Este era un procedimiento normal en aquella época, pero sólo los hijos de los ricos y los poderosos podían pagar para beneficiarse de este tipo de enseñanza, lo cual hacía que, cuando estos jóvenes terminaban sus estudios y volvían a sus casas, la fama de Galileo se extendiera precisamente en aquellos círculos en que a él le beneficiaba más ser famoso.

La enseñanza que recibían estos alumnos particulares en casa de Galileo era en algunos aspectos muy diferente de la que él se veía obligado a impartir en las clases oficiales que daba en la universidad. Aunque se le daba el nombre de profesor de matemáticas, su programa incluía lo que actualmente llamaríamos física y que entonces se denominaba filosofía natural. En aquella época el programa oficial de estudios todavía estaba basado en gran medida en Aristóteles, y Galileo, cumpliendo con su deber, aunque sin entusiasmo, enseñó siguiendo la línea ortodoxa en todas sus clases magistrales. Sin embargo, en privado explicaba ideas nuevas y nada convencionales sobre el mundo, e incluso escribió el primer borrador de un libro en el que detallaba algunas de estas ideas, pero decidió no publicarlo —lo

que fue seguramente una sabia decisión para un joven que todavía tenía que llegar a su meta.[5]

Otra de las leyendas que Viviani contó sobre Galileo se refería a la época de éste como profesor de matemáticas en Pisa, pero, también en este caso, lo más probable es que no sea cierta. Se trata de la famosa historia sobre cómo Galileo dejó caer objetos de pesos diferentes desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa para demostrar que llegarían al suelo al mismo tiempo. No hay pruebas de que hiciera alguna vez tal cosa, aunque en 1586 un ingeniero flamenco, Simón Stevin (1548-1620; conocido también como Stevinus), llevó a cabo realmente estos experimentos, utilizando pesas de plomo que dejó caer desde una torre de unos diez metros de altura. Los resultados de estos experimentos habían sido publicados y es posible que Galileo los conociese. La relación entre Galileo y los pesos que alguien dejó caer desde lo alto de la Torre Inclinada —que Viviani erróneamente sitúa en la época en que Galileo fue profesor de matemáticas en Pisa— data en realidad de 1612, año en que uno de los profesores de la antigua escuela aristotélica realizó el experimento con el fin de refutar la afirmación de Galileo de que los objetos de pesos diferentes caen a la misma velocidad. Los pesos tocaron el suelo casi de manera simultánea, pero no exactamente en el mismo instante, hecho que los peripatéticos consideraron como una prueba de que Galileo estaba equivocado. Este fue directo en su respuesta:

> Aristóteles dice que una bola de cien libras de peso que caiga de una altura de cien codos llega al suelo antes que una bola de una libra que caiga desde una altura de un codo. Yo afirmo que llegan al mismo tiempo. Si se hace la prueba, se ve que la bola mayor adelanta a la menor por dos pulgadas. Ahora bien, detrás de esas dos pulgadas queréis esconder los noventa y nueve codos de Aristóteles, y habláis sólo de mi error, pero guardáis silencio sobre su enorme equivocación.

La versión auténtica de esta historia nos dice dos cosas. Primero, ilustra el poder del método experimental —incluso a pe-

sar de que los peripatéticos pretendían que los pesos caían a velocidades diferentes y que así se probaba que Aristóteles tenía razón, el experimento que realizaron demostró que Aristóteles estaba equivocado—. Los experimentos honestos dicen siempre la verdad. Segundo, la cita que hemos reproducido anteriormente da una idea clara de cómo eran el estilo y la personalidad de Galileo. Es imposible creer que, si hubiera llevado a cabo él mismo el famoso experimento, no mencionara su triunfo en ninguno de sus escritos. Podemos estar seguros de que nunca hizo tal experimento.

Realmente Galileo nunca encajó del todo en la Universidad de Pisa, por lo que enseguida empezó a buscar otro empleo. Se negó a vestir la toga de los académicos, que era el símbolo de su cargo, burlándose de sus colegas por estar éstos más interesados por los atavíos correspondientes a su posición que por investigar cómo funcionaba realmente el mundo, y llamaba la atención (en aquel tiempo tenía toda la cabeza cubierta de cabellos rojos y una considerable barba, también roja) cuando confraternizaba con estudiantes en las tabernas más sórdidas de la ciudad. Además de sus puntos de vista heterodoxos (los cuales hacían cada vez más improbable la renovación de su nombramiento, que tenía que producirse en 1592), la necesidad de conseguir unos ingresos más altos llegó a ser acuciante en 1591, cuando falleció Vincenzio Galilei. Lejos de dejar alguna herencia sustancial a sus hijos, poco tiempo antes de su muerte Vincenzio había prometido una dote generosa para su hija Virginia; en consecuencia, Galileo y Michelangelo Galilei, su hermano menor, se convirtieron en los responsables legales de esta deuda. En la práctica, esto significó que Galileo, como cabeza de familia, tuvo que asumir la deuda, ya que Michelangelo no sólo omitió pagar su parte, sino que se convirtió en un músico itinerante y sin recursos, que continuamente regresaba para pedir a Galileo «préstamos» que nunca pagaba. Todo ello resul-

tó extremadamente gravoso para Galileo, ya que a él también le gustaba gastar dinero, disfrutar de buenos vinos y buena comida, e invitar a sus amigos generosamente cuando disponía de fondos.

El cargo que Galileo se propuso conseguir era la cátedra de matemáticas de la Universidad de Padua. Además de ser un empleo más prestigioso y mejor pagado, Padua formaba parte de la República de Venecia, un Estado lo suficientemente rico y poderoso como para poder plantar cara a Roma y donde se favorecía el desarrollo de nuevas ideas, en vez de desaprobarlas. Galileo hizo campaña para conseguir el puesto, visitando la propia Corte veneciana, donde recibió el apoyo del embajador de Toscana. Cuando quería, Galileo podía resultar encantador y desplegar una gran habilidad social, por lo que produjo buena impresión en Venecia, donde entabló amistad especialmente con Gianvincenzio Pinelli, un intelectual adinerado que poseía una amplia biblioteca de libros y manuscritos, y con el general Francesco del Monte, el hermano menor de Guidobaldo. Consiguió el empleo, inicialmente para cuatro años y con un salario de 180 coronas al año, además de la cláusula en que se establecía que el Dux, máxima autoridad de la República de Venecia, podía renovar el nombramiento por dos años más, si lo deseaba. Con el permiso del Gran Duque de Toscana, Galileo aceptó este nuevo empleo en octubre de 1592, cuando tenía 28 años de edad. (El Gran Duque era en aquel momento Ferdinando; Cosimo había muerto en 1574 y su sucesor fue el hermano mayor de Ferdinando, Francesco, pero éste había fallecido en 1587 sin dejar herederos varones, aunque su hija María llegó a ser reina de Francia). Aquel nombramiento que inicialmente era para cuatro años se amplió a una estancia de dieciocho años en Padua, que Galileo recordaría posteriormente como los años más felices de su vida.

Galileo vivió sus momentos más brillantes en Padua en varios aspectos prácticos: primero, con un tratado sobre fortificaciones militares (un tema de importancia considerable para la República de Venecia) y luego con un libro de mecánica, basado en las clases que estaba impartiendo en la universidad. Entre otras cosas, Galileo explicó claramente cómo funcionan los sistemas de poleas, de tal manera que, aunque a primera vista pudiera parecer milagroso —como conseguir algo a cambio de nada— que, por ejemplo, un peso de 1 kilogramo se utilice para levantar otro de 10 kilogramos, para lograr esto el peso de 1 kilogramo ha de moverse diez veces más que el de 10 kilogramos, como si hiciera diez viajes para levantar diez pesos de 1 kilogramo. También la vida social e intelectual de Galileo floreció en Padua, desarrollándose en torno a sus nuevos amigos, entre los que estaba Pinelli. En este nuevo círculo de amistades estaban en particular dos hombres que desempeñarían un importante papel durante los últimos años de la vida de Galileo —el fraile Paolo Sarpi y el cardenal Roberto Bellarmine—. Aunque Sarpi llegó a ser amigo íntimo de Galileo y Bellarmine tenía una relación amistosa con él (aunque no fuera mucho más que un conocido), ambos representaban posturas religiosas muy diferentes. Sarpi era un católico tan poco ortodoxo que, más tarde, algunos de sus opositores llegarían a sospechar que era un protestante encubierto, mientras que Bellarmine era una figura destacada de la Iglesia oficial, un teólogo e intelectual que desempeñaría un papel importante en el procesamiento de Giordano Bruno por herejía.[6]

Sin embargo, aunque Galileo gozaba ahora de una alta consideración como profesional y se movía en círculos influyentes, seguía estando constantemente preocupado por el dinero. Intentó solucionar sus problemas financieros inventando algo que pudiera hacerle rico. Entre sus ideas de los primeros tiempos estuvo la invención de uno de los primeros termómetros,

que funcionaba «al revés» de lo que conocemos actualmente. Era un tubo de cristal, abierto por uno de sus extremos y con un ensanchamiento en forma de bulbo en el otro, que se calentaba primero (para expulsar parte del aire) y luego se colocaba verticalmente con el extremo abierto hacia abajo en un recipiente con agua. A medida que el aire del tubo se enfriaba y se contraía, dicho tubo succionaba el agua, haciendo que ésta ascendiera por su interior. Una vez se había colocado el termómetro, si aumentaba la temperatura, el aire que quedaba en el tubo se expandía, empujando hacia abajo el nivel del líquido, mientras que, si perdía temperatura, el aire se contraía aún más, con lo que el agua era succionada aún más, subiendo por el interior del tubo. Este invento no tuvo éxito, porque la altura del líquido dentro del tubo dependía también de la presión variable existente en el aire exterior. Sin embargo, nos muestra lo ingenioso que era Galileo y su habilidad para los trabajos prácticos.

Galileo inventa el «compás»

Otra idea que desarrolló Galileo a mediados de la década de 1590 tuvo un discreto éxito, pero no le hizo rico. Se trataba de un artilugio conocido como «compás» —un instrumento de metal graduado que se podía utilizar como calculadora—. Inicialmente fue un aparato destinado a ayudar a los artilleros en el cálculo de las elevaciones requeridas para disparar sus cañones a distintas distancias, pero en los años posteriores fue desarrollado hasta convertirlo en un instrumento utilizable para cualquier tipo de cálculo —el equivalente a una calculadora de bolsillo del siglo XVI— que servía para asuntos tan prácticos como calcular tipos de cambio de divisas o cálculos relativos al interés compuesto. Hacia finales de la década de 1590, este instrumento de cálculo se vendía tan bien que durante un breve

espacio de tiempo Galileo tuvo que contratar a un trabajador especializado para que se lo fabricara. Galileo demostró su perspicacia para los negocios vendiendo los compases a un precio relativamente barato y cargando unas tasas considerables por dar clases a quienes quisieran aprender a utilizarlos. Pero esto no podía durar, ya que no había modo alguno de impedir que otros copiaran el instrumento, ni de que los que ya sabían manejarlo transmitieran sus conocimientos.

Sin embargo, aunque la mejora en los ingresos de Galileo derivada del invento de este aparato duró poco, llegó justo a su debido tiempo. En la segunda mitad de la década de 1590, sus compromisos personales se habían multiplicado, tras comenzar una relación estable con Marina Gamba, una mujer de Padua perteneciente a una clase social inferior. Galileo y Marina nunca se casaron (de hecho, nunca vivieron juntos en la misma casa), pero era una relación públicamente reconocida y tuvieron tres hijos —dos hijas nacidas en 1600 y 1601, y un hijo que nació en 1606. Este hijo, llamado Vincenzio igual que su abuelo, fue reconocido posteriormente de manera legal por Galileo como heredero suyo y recibió su apellido. Con respecto a las hijas, decidió que su destino fuera hacerse monjas, una decisión que pudo estar marcada por los continuos problemas de Galileo para encontrar dinero con que pagar las dotes de sus hermanas y que quizá derivó del propósito de no verse en la misma situación con sus hijas. El mismo año en que nació la segunda hija de Galileo, en 1601, se casó su hermana Livia, y con tal motivo Galileo y Michelangelo, que entonces vivía en Alemania, le prometieron, como a Virginia, una rica dote. Una vez más, Michelangelo nunca llegó a pagar su parte.

En 1603, Galileo contrajo una enfermedad que iba a afectarle durante el resto de su vida. En el transcurso de una visita, junto con unos amigos, a una villa situada en las colinas cercanas a Padua, disfrutó de un paseo (como solía hacer a menudo)

por el campo, seguido de una comida copiosa, y luego se echó a dormir con sus dos compañeros en una habitación a la que llegaba aire fresco procedente de unas bodegas cercanas a través de un sistema de conductos. Esta forma primitiva de aire acondicionado estaba cerrada cuando los tres hombres se fueron a dormir, pero más tarde un criado abrió el sistema, dejando que el aire fresco y húmedo de las bodegas entrara en la habitación. Los tres enfermaron gravemente y uno de ellos murió. Parece ser que en esto hubo algo más que un enfriamiento, siendo probable que algún tipo de gas tóxico existente en las bodegas pasaran a la habitación. Fuera cual fuese la causa exacta, Galileo sufrió a partir de entonces y durante el resto de su vida repetidos ataques de indisposición por artritis, que a veces le obligaban a guardar cama durante varias semanas seguidas. Siempre creyó que su enfermedad crónica era resultado de aquella confrontación con la muerte a la que había vencido en 1603.

En 1604, cuando tenía 40 años de edad, Galileo se había hecho ya una buena reputación como experto en filosofía natural y matemáticas, proporcionando beneficios prácticos al Estado veneciano, y llevaba una vida plena y feliz en Padua. Fue allí donde llevó a cabo sus famosos experimentos con péndulos y también con bolas que descendían rodando por planos inclinados. Utilizó estas bolas para estudiar la aceleración y consiguió demostrar que objetos de distinto peso alcanzan la misma velocidad al estar sometidos a la aceleración que produce la fuerza de la gravedad (una demostración que hizo sin recurrir a dejar caer objetos verticalmente). Una característica fundamental del trabajo de Galileo es que siempre realizó experimentos para comprobar las hipótesis, modificándolas o descartándolas si los resultados de los experimentos no se ajustaban a las predicciones. Galileo hizo también investigaciones en el campo de la hidrostática; siguiendo en la línea de la obra de Gilbert, estudió fenómenos magnéticos; y mantuvo correspondencia con otros

expertos en filosofía natural, incluido el propio Kepler (fue en una carta a Kepler escrita en mayo de 1597 donde Galileo manifestó por primera vez claramente su entusiasmo por el modelo copernicano del universo). Paralelamente a todo esto, Galileo llevaba una intensa vida privada. Estudiaba literatura y poesía, asistía al teatro con regularidad y continuaba tañendo el laúd con gran maestría. Sus clases tenían gran aceptación (aunque pronto comenzó a considerarlas como una tarea rutinaria que le distraía de su trabajo experimental y de su vida social), pero su creciente fama de antiaristotélico sólo acrecentó su prestigio en la República de Venecia, que era un Estado de librepensadores. Nunca habían surgido dudas con respecto al hecho de que su contrato en la universidad se renovaría cada vez que llegara la fecha de expiración y, además, su salario se había incrementado lo suficiente para que pudiera vivir holgadamente, aunque no fuera capaz de ahorrar ni una corona por si acaso llegaba una época de vacas flacas, y muchos menos de hacer previsiones para el día en que se retirara de su cargo.

Los estudios de Galileo sobre las supernovas

La talla de Galileo como científico creció aún más cuando la supernova que había estudiado Kepler apareció en el cielo en octubre de 1602. Utilizando las rigurosas técnicas de observación que había desarrollado a través de sus trabajos para el ejército, Galileo se convirtió en astrónomo (por primera vez) y constató que la nueva estrella no se desplazaba en el cielo con respecto a las demás estrellas. Dio una serie de conferencias, que fueron bien recibidas por el público, argumentando en ellas que dicha nueva estrella debía estar tan lejos de la Tierra como las otras estrellas, refutando así la idea aristotélica de que la esfera celeste era invariable, y resumió sus conclusiones en un breve poema:

No se encuentra a menor altura que otras estrellas
y no se desplaza de un modo diferente
al de todas las estrellas fijas ni cambia de aspecto o tamaño.
Todo esto lo demuestra la razón más pura;
no vemos indicios de paralaje los que estamos
en la Tierra a causa de las enormes dimensiones del cielo.[7]

Sin embargo, mientras la fama de Galileo aumentaba en la esfera pública, su vida privada comenzaba a plantearle problemas. En 1605, sus dos cuñados habían presentado demandas contra él en Florencia por impago de los plazos correspondientes a las dotes de sus hermanas. Gianfrancesco Sagredo, un noble veneciano nueve años más joven que Galileo y amigo suyo, pagó los gastos del juicio e hizo todo lo que pudo para retrasar el proceso, pero durante el verano de 1605 Galileo tuvo que acudir a Florencia para presentar sus alegaciones en relación con el caso. Muy oportunamente, justo en este momento, la Gran Duquesa de Toscana, Cristina, llamó a Galileo para que instruyera a su hijo adolescente, Cosme, en el manejo del compás militar, inventado por el propio Galileo, y le diera clases de matemáticas en general. Esta muestra evidente de la posición que ocupaba Galileo en la Corte (quizá combinada con algunas presiones directas ejercidas por Cristina sobre la magistratura) dio como resultado que las demandas presentadas contra él fueran desapareciendo discretamente, al menos por el momento. Sin embargo, este viaje sirvió también para que reviviera en Galileo el deseo de regresar a Toscana para pasar allí la última etapa de su vida, preferiblemente con algún nombramiento en la Corte que le evitara la necesidad de dar clases.[8] Se trataba de una posibilidad real, ya que el matemático de la Corte de Florencia (Ostilio Ricci, que en otros tiempos había iniciado a Galileo en el estudio de las matemáticas) había fallecido en 1603 y el cargo estaba todavía vacante. Galileo emprendió su campaña personal para conseguir el regreso a Toscana, publicando el

manual de instrucciones para la utilización del compás y dedicándoselo al príncipe Cosme de Médicis en 1606. Aunque Galileo volvió a ser nombrado para el puesto que tenía en Padua (con un nuevo aumento de salario), mantuvo completamente abiertas sus líneas de comunicación con Toscana.

Mientras Galileo veía cómo se producían cambios importantes en su vida personal, y al mismo tiempo reunía todos los materiales de sus años de trabajo experimental para un libro que estaba proyectando, la situación política en Italia experimentó un cambio drástico. En 1605, Pablo V había sido elegido Papa e hizo un esfuerzo decidido por extender la autoridad de la Iglesia y afianzar el poder papal en los estados católicos. El obstáculo, por lo que respecta al Papa, era que carecía de ejércitos poderosos propios, y extender su influencia significaba o bien confiar en el poder temporal de otros, o ejercer su autoridad espiritual (con ayuda de la Inquisición). Venecia era especialmente una espina que el Papa tenía clavada, en gran medida a causa de que Paolo Sarpi, que era a la sazón consejero teológico del Dux, afirmaba públicamente que el camino hacia el cielo pasaba exclusivamente por las obras espirituales y negaba el llamado *derecho divino* de reyes y papas para ejercer el poder político en nombre de Dios. En el extremo opuesto del debate, el principal apoyo intelectual para la idea de este derecho divino procedía del cardenal Roberto Bellarmine, que en aquel momento representaba en gran medida el poder que se encontraba detrás del trono de Roma, en parte porque Pablo V sabía que debía su puesto a la decisión de Bellarmine de no permitir que su propio nombre fuera propuesto para la elección. Había otros aspectos de la disputa en los que no vamos a entrar aquí, ya que no tienen una relación tan directa con la vida de Galileo. Finalmente, el resultado fue que en 1606 el Papa excomulgó al Dux de Venecia y a todos sus funcionarios, incluido Sarpi. Aunque hubo algunos problemas de conciencia entre los

sacerdotes de Venecia, en general esta república ignoró ampliamente la excomunión y siguió con sus asuntos (incluidos los religiosos) en la forma habitual. Como represalia, todos los jesuitas fueron expulsados de la República de Venecia. Quedaba claro que la influencia espiritual, incluso la amenaza del fuego eterno, no había logrado en este caso extender la autoridad del Papa y, durante algún tiempo, la única alternativa —la guerra— parecía una posibilidad real, mientras la católica España se alineaba para defender al Papa, y Francia (que en esta época era protestante en gran medida) ofrecía su ayuda a Venecia.

Sin embargo, la crisis terminó al cabo de unos pocos meses y, cuando se relajó la tensión, Sarpi fue invitado a Roma para discutir sus puntos de vista teológicos con Bellarmine, mientras se le aseguraba que «sería agasajado y bien recibido». Sarpi declinó la invitación, alegando que estaba demasiado ocupado con los asuntos de Estado en Venecia, mientras decía a sus amigos que sabía de sobra que los argumentos que probablemente utilizaría el Vaticano serían, entre otros, la soga y la hoguera. Con el fin de respaldarle, el Senado veneciano le prohibió oficialmente que saliera de la República. El Vaticano, ya que no podía quemar a Sarpi en la hoguera, optó por quemar sus libros. El Senado de Venecia inmediatamente le duplicó el salario. Venecia había ganado la batalla política frente a Roma y la influencia de Sarpi en la República veneciana era mayor que nunca. Sin embargo, durante la noche del 7 de octubre de 1607, Sarpi fue atacado salvajemente en la calle por cinco hombres que le dieron quince puñaladas y le dejaron un estilete hincado en su cabeza, de tal forma que entraba por su sien derecha y salía por su mejilla izquierda. Para asombro de todos, Sarpi sobrevivió (al igual que los presuntos asesinos, que huyeron a Roma).

El atentado contra la vida de Sarpi impresionó profundamente a Galileo, que se dio cuenta de que, incluso aunque la

República de Venecia pudiera resistir frente a Roma, los individuos que no siguieran la línea católica correrían riesgos en cualquier lugar de Italia. Para colmo, el invierno de 1607-1608 fue extraordinariamente duro, con grandes nevadas en Padua, y durante marzo y abril de 1608 Galileo vio su salud gravemente afectada por sus problemas artríticos. A pesar de todas estas dificultades, continuó con la preparación de su gran libro sobre mecánica, inercia y movimiento. Fue por aquel entonces cuando Galileo constató y demostró que una bala disparada mediante un arma o un objeto lanzado al aire describe una trayectoria en forma de parábola, una curva del tipo de la elipse pero abierta. A pesar de que ya estaban a principios del siglo XVII, muchos creían todavía que, si se disparaba una bala horizontalmente desde un cañón, esta bala volaría a cierta distancia en línea recta, para caer luego verticalmente al suelo; otros más observadores habían notado (o sospechado) que en realidad la bala seguía una trayectoria curva, pero, hasta que Galileo hizo su estudio, nadie sabía qué forma tenía dicha curva, ni siquiera si era siempre la misma curva independientemente de la velocidad y el peso de la bala que disparaba el cañón. Galileo demostró también que si la bala choca contra un objetivo situado a la misma altura sobre el nivel del mar que la boca del cañón, lo hace a la misma velocidad que tenía al salir del arma (despreciando la resistencia del aire).

Las preocupaciones de Galileo debidas al dinero y a su mala salud le distrajeron de su trabajo cuando, durante el verano de 1608, la Gran Duquesa de Toscana, Cristina, le pidió que fuera a Florencia para supervisar la construcción de un gran embarcadero de madera sobre el río Amo, que iba a ser utilizado con motivo de la boda de su hijo. Este hijo de Cristina se convirtió en el Gran Duque Cosme II en 1609, a la muerte de Fernando. Independientemente de lo importante que fuera el proyecto, Galileo no podía negarse ante un llamamiento de Cristina,[9] y

además esto era una señal de que todavía contaba con el favor de los gobernantes de Florencia, donde el cargo de matemático de la Corte seguía vacante. Sin embargo, después de regresar a Padua, habiendo cumplido ya los 45 años a principios de 1609, Galileo continuaba con sus preocupaciones financieras, nervioso por la posibilidad de ser blanco de la hostilidad del Vaticano por ser un conocido copernicano y amigo de Sarpi, y todavía ansioso de encontrar una gran idea a la que pudiera dar una aplicación práctica y asegurarse así su posición económica para lo que le quedaba de vida. En este punto es donde empiezan la mayoría de las historias sobre la contribución de Galileo a la ciencia.

LIPPERSHEY REINVENTA EL TELESCOPIO

En julio de 1609, durante una visita a Venecia, Galileo oyó por primera vez rumores sobre la invención del telescopio (en sentido estricto, una reinvención, pero en el siglo XVI nunca se había difundido ningún tipo de información sobre los telescopios de Digges). En esta ocasión, las noticias habían tardado mucho en llegar a Italia, ya que Hans Lippershey, un fabricante de anteojos afincado en Holanda, había hecho el descubrimiento por casualidad durante el otoño anterior, y en la primavera de 1609 se vendían como juguetes en París unos telescopios cuya potencia amplificadora era de tres aumentos. Cuando los rumores sobre este extraño instrumento llegaron a oídos de Galileo, éste pidió consejo a Sarpi y le sorprendió saber que su amigo se había enterado del asunto varios meses antes y lo había comentado en la correspondencia que mantenía con Jacques Badovere, un noble francés residente en París que había sido en otros tiempos alumno de Galileo. Sin embargo, Sarpi no había comunicado esta noticia a Galileo —la correspondencia entre ambos se había ido espaciando cada vez más, en parte debido a

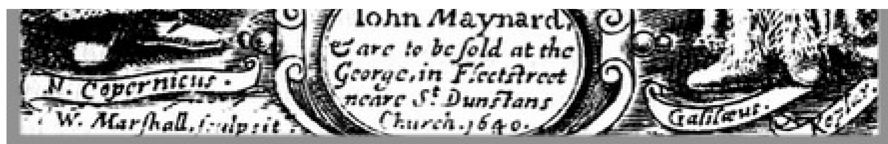
que a Sarpi le ocupaban mucho tiempo sus obligaciones como asesor del Senado, y en parte por la fatiga que había empezado a sentir después de recuperarse del intento de asesinato—. Aunque en el caso de Sarpi es posible que éste tardara en percatarse de la importancia del descubrimiento, Galileo se dio cuenta inmediatamente de que un instrumento que permitiera ver objetos lejanos tendría una importancia militar y comercial enorme en Venecia, donde a veces había fortunas en juego que dependían de quién fuera el primero en identificar los barcos que se acercaban al puerto. Cuando discurría el modo de obtener beneficios a partir de la información que le había llegado sobre el invento del telescopio, Galileo pensó seguramente que esta vez era su propio barco el que por fin había llegado a puerto.

GALILEO DESARROLLA EL INVENTO

Pero entonces era ya casi demasiado tarde. A principios de agosto, mientras Galileo estaba aún en Venecia, oyó decir que un holandés había llegado a Padua con uno de aquellos nuevos instrumentos. Galileo regresó a Padua apresuradamente, pero se encontró con que el extranjero ya se le había escapado y estaba en aquel momento en Venecia intentando vender el instrumento al Dux. Enloquecido ante la posibilidad de perder en la competición, Galileo se puso a trabajar frenéticamente para construir su propio telescopio, sabiendo únicamente que el instrumento tenía dos lentes colocadas dentro de un tubo. Una de las hazañas más impresionantes de toda la carrera de Galileo es que en 24 horas construyó un telescopio[*] mejor que cualquier otro de los que se conocían en aquella época. La versión holandesa utilizaba dos lentes cóncavas, dando así una imagen invertida, pero Galileo utilizó una lente convexa y otra cóncava, con lo que obtenía la imagen en su posición correcta. El 4 de agosto

envió a Venecia un mensaje codificado para Sarpi, en el que le informaba del éxito; Sarpi, como asesor del Senado, retrasó cualquier decisión que pudiera tomarse con respecto al visitante holandés, con lo que dio a Galileo el tiempo necesario para que éste construyera un telescopio que tenía una potencia amplificadora de diez aumentos y se transportaba en un estuche de cuero labrado. Galileo volvió a Venecia antes de que terminara el mes de agosto y causó sensación en el Senado cuando realizó una demostración del funcionamiento del telescopio. Como era astuto para la política, a continuación entregó el telescopio al Dux en concepto de regalo. El Dux y el Senado, encantados con el instrumento, ofrecieron a Galileo la posibilidad de que ocupara su cargo de la Universidad de Pisa de forma vitalicia y duplicaron su salario fijándolo en 1000 coronas anuales.


Saturnus.
Iupiter.
Mars.
Ceres et Proserpina.
Venus.
Omnibus do lucem. calorem motum.
Universa ornant.
Mundo se illuminant
Quid si sic ?
Vtinam et alæ.
Hic ejus oculi.
A Discourse concerning A NEW world & Another Planet In 2 Bookes.
Printed for



9. Copérnico, Kepler y Galileo con el telescopio de este último y el nuevo modelo del universo. (Tomado de una antigua exposición inglesa, 1640).

Galileo aceptó esta oferta, a pesar de que el aumento de salario sólo sería efectivo a partir del año siguiente, y a pesar de que con la aceptación de este empleo se comprometería a cumplir con la pesada tarea de enseñar. Pero, acto seguido, se marchó a Florencia con el fin de hacer la demostración de otro telescopio ante Cosme II. Para diciembre de 1609, Galileo había fabricado ya un telescopio con una potencia de amplificación de veinte aumentos (y en marzo de 1610 tendría hechos ya nueve más con una potencia similar; envío uno de éstos al elector de Colonia, para que Kepler, el único astrónomo que tuvo este honor, lo utilizara para verificar los descubrimientos de Galileo). Utilizando el mejor de todos sus instrumentos, Galileo descubrió las cuatro lunas más brillantes (y de mayor tamaño) de Júpiter a principios de 1610. Dio a estas lunas el nombre de «estrellas de los Médicis» en honor a Cosme II, pero los astrónomos las denominan actualmente satélites galileanos de Júpiter. Con el mismo instrumento, Galileo descubrió que la Vía Láctea está formada por miríadas de estrellas y que la superficie de la Luna no es una superficie esférica perfectamente lisa (como creían los aristotélicos), sino que está toda ella marcada por cráteres y tiene cordilleras con montañas de varios kilómetros de altura (calculó las alturas de las montañas a partir de las longitudes de las sombras que proyectan sobre la superficie lunar). Presentó todos estos descubrimientos en marzo de 1610, en un pequeño libro titulado *Siderius Nuncius* (*El mensajero de las estrellas*). Este libro estaba dedicado al gran duque Cosme II de Médicis —¿a quién si no?

El autor de *Siderius Nuncius* se hizo famoso entre las personas cultas de todo el mundo (el libro se tradujo al chino antes de los cinco años posteriores a su publicación) y estaba claro que supondría un honor añadido para cualquier Estado al que Galileo sirviera, especialmente al Estado en el que nació. En mayo de 1610, Galileo aceptó la oferta de ocupar la cátedra de

matemáticas en la Universidad de Pisa, siendo nombrado filósofo y matemático vitalicio de la Corte del Gran Duque de Toscana, con un salario de 1000 coronas anuales. En cualquier caso no tendría que dedicarse a ningún tipo de actividad como enseñante. Además, había algo que le haría aún más dulce la vida: Galileo quedaba liberado de cualquier obligación relativa a los pagos de la parte que correspondía a Michelangelo en las dotes de las dos hermanas, puesto que él ya había pagado de sobra la parte que tenía que aportar.

Galileo no se sentía en absoluto comprometido con la República de Venecia, puesto que, según decía, aún no había comenzado a recibir el aumento de salario prometido, y el nuevo contrato no había entrado en vigor, por lo cual volvió a Florencia para asumir sus nuevas obligaciones en octubre, justo cuando le llegaron noticias de que Kepler había observado realmente los cuatro satélites de Júpiter. El traslado ocasionó grandes cambios en la vida privada de Galileo. Marina Gamba decidió quedarse en Padua, donde había vivido toda su vida, y la pareja se separó, según parece amistosamente. Las dos hijas de Galileo fueron a vivir con la madre de éste en Florencia, mientras su hijo permanecía con Marina por el momento, hasta que tuviera una edad adecuada para reunirse con su padre. Sin embargo, estos altibajos personales fueron poca cosa comparados con las consecuencias que los nuevos descubrimientos científicos de Galileo iban a provocar al sacudir un nido de avispas.

Las observaciones astronómicas eran una prueba directa de la exactitud del modelo copernicano. Un contraargumento que habían utilizado anteriormente los peripatéticos era, por ejemplo, que, dado que la Luna describe una órbita en torno a la Tierra, no era posible que la Tierra describiera al mismo tiempo una órbita alrededor del Sol, porque en ese caso la Tierra y la Luna se separarían la una de la otra. Al descubrir cuatro satélites que giraban describiendo órbitas en torno a Júpiter, el cual

describía por sí mismo evidentemente una órbita en torno a alguna otra cosa (si esa cosa era la Tierra o el Sol, era algo que no afectaba para nada a este argumento), Galileo demostró la posibilidad de que la Luna estuviera girando en órbita alrededor de la Tierra, aunque la Tierra también se moviera. Poco antes de marcharse de Padua, Galileo observó algo extraño en relación con el aspecto de Saturno, y aunque la explicación del fenómeno tendría que esperar a que la obra de Christiaan Huygens lo aclarara, dicho fenómeno indicaba claramente que Saturno no era una esfera perfecta. Poco después de su llegada a Florencia, Galileo descubrió las fases de Venus, que son unos cambios en el aspecto del planeta similares a las fases de la Luna y que sólo se pueden explicar si Venus describe una órbita alrededor del Sol. Pero, aún hay más con respecto a esto, ya que Galileo había recibido una carta de un antiguo alumno, Benedetto Castelli, en la que éste le indicaba que, si el modelo copernicano era correcto, Venus «debía» mostrar distintas fases. Aunque Galileo ya había comenzado a realizar observaciones del planeta Venus cuando recibió la carta, y no tardó en contestar a Castelli diciéndole que su predicción era correcta, éste es un ejemplo típico de cómo se utiliza una hipótesis científica para hacer una predicción que luego se comprueba mediante la observación, viéndose finalmente que la predicción apoya la hipótesis —el más potente tipo de aplicación del auténtico método científico.

Nada de esto logró convencer a los aristotélicos más intransigentes, quienes sencillamente se negaban a aceptar que lo que se veía a través del telescopio fuera real, imaginándose que era algún tipo de objeto producido por las lentes. El propio Galileo comprobó esta posibilidad observando cientos de objetos a través del telescopio y comparando sus imágenes con lo que podía ver de cerca, directamente, con el fin de averiguar si el instrumento hacía algo que no fuera ampliar los objetos, y llegó a la

conclusión de que era real todo lo que veía a través del telescopio. Sin embargo, aunque hoy en día pueda parecer ridícula la reticencia de los aristotélicos a creer algo que es evidente, estas dudas constituían un aspecto que tiene una importancia considerable en la ciencia actual, en la que los astrónomos comprueban las enormes distancias del universo y la física de partículas explora la estructura interna de los átomos y de entidades aún menores, y nos fiamos plenamente de lo que nos dicen nuestros instrumentos y del modo en que lo interpretamos. Sin embargo, por lo que respecta a Galileo, está claro que lo que vio era real, en el sentido habitual de la palabra. Una de las cosas que Galileo observó también por aquella época, utilizando un telescopio, fue la existencia de unas formas oscuras sobre la superficie del Sol: las manchas solares. Otros astrónomos las habían visto ya, pero Galileo no estaba enterado de eso. Aquellas manchas visibles en la superficie del Sol parecían ser otra realidad que socavaba la perfección celeste en la que creían los aristotélicos.

Aunque todas estas pruebas eran ciertamente contrarias a la idea aristotélica y se podían utilizar para apoyar el modelo copernicano, Galileo había puesto sumo cuidado en no asumir el modelo de Copérnico públicamente, porque tenía muy presente el destino de Giordano Bruno. Prefirió presentar sus pruebas y dejar que las observaciones hablaran por sí mismas, convencido de que, más bien pronto que tarde, incluso la Iglesia de Roma tendría que aceptar las implicaciones. Como un primer paso en este proceso, en marzo de 1611, Galileo partió para visitar Roma como embajador científico oficial del Estado de Toscana. Esta visita, que se prolongó hasta julio, fue a primera vista un triunfo. No sólo fue recibido por el Papa (que aún era Pablo V), sino que se le permitió hablar con Su Santidad en pie, en vez de tener que hacerlo arrodillado. El propio cardenal Bellarmine miró a través del telescopio de Galileo y nombró lo

que llamaríamos actualmente un comité científico de sacerdotes eruditos que examinaría las afirmaciones de Galileo relativas a lo que había observado con el instrumento. Los miembros de este comité (jesuitas) llegaron a las siguientes conclusiones:

1. La Vía Láctea está formada realmente por un gran número de estrellas;
2. Saturno tiene una extraña forma ovalada con protuberancias a cada lado;
3. La superficie de la Luna es irregular;
4. Venus presenta fases;
5. Júpiter tiene cuatro satélites.

Era un resultado oficial. Sin embargo, no se hizo mención de ninguna de las posibles implicaciones derivadas de estas observaciones.

Además, mientras estuvo en Roma, Galileo se convirtió en miembro de la que se considera la primera sociedad científica del mundo, un grupo conocido como la Accademia dei Lincei (de los linces), que había sido fundada por cuatro jóvenes aristócratas en 1603. Fue en un banquete que los «linces» celebraron en honor de Galileo donde se propuso por primera vez llamar «telescopio» a aquel instrumento amplificador. Durante el tiempo que pasó en Roma, Galileo hizo también exhibiciones de manchas solares, utilizando un aparato, que actualmente es un objeto habitual, para proyectar en una pantalla blanca la imagen del Sol que se veía a través de un telescopio. Pero no parece que en aquel momento Galileo considerara importante el descubrimiento de aquellas formas oscuras presentes en la superficie solar. En junio, volvió triunfante a Florencia, después de haber cubierto de gloria el nombre de Toscana por haber sido recibido tan favorablemente en Roma y haber obteni-

do (según creía él) cierto tipo de aprobación oficial para su trabajo.

Cualquier narración posible sobre el resto de la vida de Galileo está dominada inevitablemente por el choque que tuvo lugar más tarde con las autoridades de Roma. Sin embargo, esto está lejos de ser la historia completa de su vida, y merece la pena hablar aquí de un trabajo llevado a cabo durante el verano de 1611, que pone de manifiesto la amplitud de los intereses de Galileo y el modo tan claro en que aplicó el método científico. En una discusión entre profesores de la Universidad de Pisa sobre el tema de la condensación, uno de los colegas de Galileo afirmó que el hielo tenía que ser considerado como una forma condensada del agua, ya que el hielo es sólido y el agua es líquida. Por otra parte, Galileo sostenía que, puesto que el hielo flota en el agua, ha de ser más ligero (menos denso) que ésta, y por lo tanto se podría considerar como un cierto tipo de agua enrarecida.[10] El otro profesor se mostró en desacuerdo con esta idea y dijo que el hielo flotaba porque tenía una base amplia y plana que no podía abrirse camino hacia abajo en el agua. Galileo refutó este argumento señalando que si un trozo de hielo se mantiene sumergido y luego se suelta, su forma ancha y plana no le impide subir mediante un impulso hacia arriba a través del agua. A esto siguió un debate sobre si los objetos sólidos hechos del mismo material (y, por consiguiente, con la misma densidad) podían hundirse o flotar en el agua sólo por tener formas diferentes. Finalmente Galileo desafió a su principal oponente en este debate (que, por cierto, había suscitado un gran interés en Pisa) a demostrar mediante un experimento que diversos objetos con la misma composición, pero con formas diferentes, estando en principio totalmente sumergidos en el agua, emergerían o permanecerían inmersos dependiendo de la forma que tuvieran. El día en que se iba a realizar este experimento públicamente, el rival de Galileo no se presentó.

La cuestión no era que el razonamiento de Galileo fuera correcto, aunque sí lo era, sino que lo importante era su disposición a comprobar aquel razonamiento mediante experimentos claramente planeados y realizados en público, y a aceptar los resultados de los experimentos —algo que todavía era una novedad, incluso en 1611—. Esto es lo que convierte a Galileo, ante los ojos de muchos, en el primer científico; también fue lo que le llevaría finalmente a entrar en conflicto con la Iglesia, a pesar de la aparentemente cálida recepción que se le había ofrecido con anterioridad en Roma aquel mismo año.

LAS IDEAS COPERNICANAS DE GALILEO SON CONSIDERADAS HERÉTICAS

Aunque todavía era extremadamente precavido con respecto a lo que enviaba a la imprenta, a raíz de su éxito en Roma Galileo empezó a hablar más abiertamente sobre las ideas copernicanas. Sin embargo, cualesquiera que fuesen sus declaraciones públicas sobre esta cuestión, en esta época los sentimientos más íntimos de Galileo respecto al copernicanismo están fielmente reflejados en una carta que envió a la Gran Duquesa Cristina (se escribió realmente en 1614): «Sostengo que el Sol está situado en el centro de las órbitas celestes y no cambia de lugar, y que la Tierra realiza un movimiento de rotación en torno a sí misma y se desplaza alrededor del Sol». Es imposible ser más claro. Pero ¿qué hay de las preocupaciones de la Gran Duquesa Cristina, sobre la posibilidad de que todo esto chocara con la doctrina bíblica? «En las discusiones sobre fenómenos naturales», escribió Galileo, «no debemos partir de la autoridad de los pasajes bíblicos, sino de la experiencia sensorial y de las necesarias demostraciones».

Su cautela ante la publicidad se rompió sólo en una ocasión, en 1613, cuando escribió un pequeño libro sobre las manchas

solares (en realidad este libro fue publicado por la Accademia dei Lincei). En relación con este hecho hubo dos aspectos desafortunados. En primer lugar, en un prólogo quizás excesivamente generoso, los «linces» atribuían a Galileo el mérito de haber descubierto manchas en el Sol. Esto provocó una enconada pelea con el astrónomo jesuita Christopher Scheiner, quien (probablemente con razón) afirmó haberlas visto antes que Galileo (de hecho, el inglés Thomas Harriott y el holandés Johann Fabricius se habían adelantado a ambos en este descubrimiento). En segundo lugar, en un apéndice de este libro sobre las manchas solares, aparece la única afirmación clara y sin ambigüedades que Galileo publicó en defensa de las teorías copernicanas, utilizando el ejemplo de las lunas de Júpiter para justificar su alegato. Este libro y los comentarios no publicados que hizo a favor de las teorías de Copérnico fueron el detonante que empezó a provocar críticas contra Galileo. Confiando en la eficacia de su alegato y en la seguridad de que tenía amigos en Roma, Galileo, después de sufrir una enfermedad en 1615, cuando estaba ya próximo a cumplir 52 años, obtuvo un permiso para ir a Roma a finales de año con el propósito de aclarar la situación. Lo hizo desoyendo los consejos del embajador de Toscana en Roma, quien afirmó que existía un ambiente hostil contra Galileo en ciertos sectores desde su visita de 1611, a pesar del éxito aparente de ésta (a los ojos de sus oponentes, un éxito excesivo), e indicó que otra visita no haría sino empeorar las cosas. A pesar de estas advertencias, el 11 de diciembre de 1615 Galileo se convirtió en huésped oficial del embajador en la residencia de éste en Roma.

La presencia de Galileo en Roma llevó las cosas a un punto decisivo, por unos derroteros que él no se había imaginado previamente. Siguiendo el consejo de Bellarmine (que entonces tenía ya 73 años, pero continuaba detentando el poder detrás del trono de San Pedro), Pablo V formó una comisión papal que

tendría que decidir si las teorías de Copérnico eran heréticas. La conclusión a la que llegó oficialmente esta comisión fue que la idea de que el Sol estuviera en el centro del universo era «estúpida y absurda… Además de ser formalmente una herejía». A continuación, afirmaban que la teoría según la cual la Tierra se desplaza por el espacio era «como mínimo un auténtico error».

Dado que existe una cierta ambigüedad en los testimonios que se han conservado, ha sido materia de discusión entre historiadores la cuestión relativa a lo que sucedió después con respecto a Galileo. Sin embargo, Stillman Drake, de la Universidad de Toronto, ha conseguido hacer el relato aparentemente más verosímil sobre los sucesos de finales de febrero de 1616, basándose en lo que sucedió con posterioridad a estas fechas. El 24 de febrero, Pablo V dio instrucciones a Bellarmine para que le representara personalmente y le dijera a Galileo que no debía «sostener, ni defender» ninguna de las dos teorías sobre las que había emitido su juicio la comisión. Dicho de otra manera, Galileo estaba equivocado al creer en la teoría copernicana y debía abstenerse de dar argumentos a su favor, incluso desde la perspectiva de abogado del diablo, si se diera el caso. Pero las instrucciones del Papa iban más allá. Si, y sólo si, Galileo se oponía a cumplir lo que se le indicaba, la Inquisición (la famosa arma judicial del Papado responsable de combatir a los herejes) le advertiría formalmente, en presencia de un notario y de testigos, de que debía abstenerse de «sostener, defender y enseñar» (la cursiva es nuestra) las teorías de Copérnico. La diferencia crucial surgida al formular esta advertencia oficial es que, sin ella, a Galileo se le hubiera permitido enseñar a sus discípulos las teorías copernicanas, e incluso escribir sobre ellas, con tal de que hubiera tomado la precaución de explicar que se trataba de ideas heréticas y que él, Galileo, no las suscribía.

El 26 de febrero, Bellarmine recibió a Galileo para transmitirle la decisión del Papa. Por desgracia, los representantes de la

Inquisición, con testigos y todo, estaban presentes en la misma sala, dispuestos a intervenir si Galileo mostraba cualquier indicio de rechazo a cumplir lo que Bellarmine tenía que decirle. Bellarmine fue al encuentro de Galileo cuando éste llegaba a la puerta de entrada y le dijo en susurros que, pasara lo que pasara, debía aceptarlo y no plantear objeciones. Galileo, que sabía demasiado bien quiénes eran las otras personas que estaban allí, escuchó atentamente la advertencia del Papa y, desde luego, no puso objeciones. En ese momento, intervino la Inquisición, que no estaba dispuesta a que aquel hombre se le escapara, y formuló la segunda advertencia, que hacía referencia a la enseñanza. Bellarmine, furioso (o al menos fingiendo ira para dar una buena impresión y cubrir sus actos), sacó a Galileo de la sala antes de que se firmara documento alguno. Sin embargo, esto no impidió que la Inquisición depositara en el registro oficial un conjunto de «actas» de la reunión, no firmadas y no refrendadas por el notario ni por los testigos. Comenzaron a propagarse rumores de que Galileo había sido castigado de alguna manera por la Inquisición y de que en cierto modo era culpable como mínimo de algún tipo de infracción. También se murmuraba que se le había obligado a abjurar de sus creencias y a hacer penitencia delante de la Inquisición.

Está claro que Bellarmine explicó a Pablo V cuál era la situación real, ya que el 11 de marzo Galileo acudió a una larga y amistosa audiencia con el Papa, el cual afirmó expresamente que Galileo no tendría que preocuparse por su postura mientras este pontífice viviera. A pesar de esto, Galileo continuaba preocupado y volvió a consultar con Bellarmine, que escribió una declaración jurada en la que hacía constar que Galileo no había abjurado, ni había hecho penitencia alguna, ni había sido castigado por sus puntos de vista, sino que sencillamente había sido informado sobre el nuevo edicto general que afectaba a to-

dos los miembros de la fe católica. En la confianza de que estaba a salvo, al menos por el momento, Galileo regresó a Toscana.

Aunque los últimos años de la vida de Galileo estuvieron marcados por las enfermedades (aparte de su problema de artritis, sufría una grave hernia que a menudo le dejaba incapacitado) y el trabajo de preparación de su gran libro avanzaba lentamente, continuó realizando trabajos científicos entre sus 50 y sus 70 años de edad, incluido un intento de utilizar los movimientos regulares y predecibles de las lunas de Júpiter como si constituyeran una especie de reloj astronómico gracias al cual los navegantes podrían conocer la hora exacta mientras estaban en el mar y determinar así la longitud a la que se encontraba su nave (una buena idea, en principio, aunque las observaciones exactas que resultaban necesarias para ello eran impracticables con el movimiento de la cubierta del barco en el mar), y también realizó trabajos importantes sobre magnetismo. Todo esto sucedió en el marco de ciertos cambios que tuvieron lugar en la vida privada de Galileo. En parte por el reconocimiento a su avanzada edad, en 1617 Galileo pudo trasladarse a una hermosa villa —casi un palacio—, llamada Bellosguardo, situada sobre una colina al oeste de Florencia. El traslado a esta villa se produjo simultáneamente con la entrada de sus hijas Virginia, de 16 años, y Livia, de 15, en un convento situado cerca de allí, concretamente en Arcetri, donde profesaron en la orden de las clarisas pobres. Esta decisión no fue consecuencia de profundas convicciones religiosas por parte de las muchachas; Galileo vio que esta maniobra era el único modo de que sus hijas ilegítimas tuvieran una cierta seguridad en el futuro, ya que ningún hombre respetable se casaría con ellas, salvo que tuvieran una rica dote, pero su padre no tenía intención de volver a implicarse, de nuevo, en un asunto de dotes. Al entrar en la orden, Virginia tomó el nombre de María Celeste y Livia el de Arcangela. Galileo permaneció cerca de sus hijas, tanto geográfica co-

mo emocionalmente, y visitó a menudo el convento; las cartas que se han conservado de la correspondencia entre María Celeste y su padre dan una visión precisa de lo que fueron los últimos años de Galileo.

En el aspecto científico, nada más instalarse en Bellosguardo, Galileo se vio envuelto de nuevo en una controversia. En 1618, se pudo observar tres cometas y, cuando un grupo de jesuitas (entre los que estaba Scheiner) publicó un informe bastante fantástico sobre su significado, Galileo respondió de manera mordaz, sugiriendo con sarcasmo que aquellos jesuitas parecían pensar que «la filosofía es como una obra de ficción que puede inventar cualquier escritor, como por ejemplo *La Illiada*», y a continuación dijo lo siguiente sobre el libro del universo:

> No se puede comprender, a menos que se aprenda primero a entender el lenguaje y a leer el alfabeto en que está escrito. Está expresado en el lenguaje de las matemáticas y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra; sin esto, lo que se hace es caminar vagando por un laberinto oscuro.

Galileo captaba el sentido de las cosas, lo cual es ciertamente un rasgo que distingue a la ciencia actual. Por desgracia, en esta ocasión la explicación dada por Galileo sobre los cometas era errónea, por lo que no tiene sentido que entremos en los detalles de su argumentación al respecto. Pero, por proclamar que los jesuitas contaban cuentos de hadas, mientras que él hablaba de hechos, Galileo iba acumulando problemas en Roma.

A principios de la década de 1620, cuando la guerra de los Treinta Años se decantaba momentáneamente a favor del bando católico, en Italia la situación política cambiaba de tal forma que llegaría a afectar dramáticamente a Galileo. En 1621, murieron tres de las personas que estaban más profundamente involucradas en los conflictos de Galileo: Cosme II (a los 30 años de edad), que era su protector en Toscana; el papa Pablo V; y

uno de los contactos más importantes de Galileo en Roma, el cardenal Bellarmine (unas pocas semanas antes de cumplir los 79 años). La muerte de Cosme II dejó el gobierno de Toscana en manos de su esposa y de su madre, que ejercieron de regentes, ya que el futuro Fernando II sólo contaba 11 años de edad. Aunque Galileo gozaba todavía de favores en la Corte, el hecho de que el sucesor al trono fuera menor de edad debilitó gravemente la influencia de Toscana dentro de la política italiana y redujo la capacidad del Estado toscano para proteger a cualquiera que hubiera caído en desgracia en Roma. La muerte de Bellarmine dejó a Galileo privado de un testigo a su favor de cara a los acontecimientos cruciales de 1616, aunque al menos disponía de la declaración escrita de Bellarmine. Sin embargo, el fallecimiento de Pablo V parecía en principio una buena noticia para la ciencia. Le sucedió Gregorio XV, un sustituto anciano que falleció en 1623, cuando parecía finalmente que las cosas iban mejor para Galileo.

Justo antes de morir Gregorio XV, Galileo recibió un permiso oficial de Roma para publicar un nuevo libro, *El aquilatador*, que había surgido a partir de sus trabajos sobre los cometas, pero terminó cubriendo un tema mucho más amplio y presentando claramente su argumentación científica —la famosa cita que hemos reproducido anteriormente sobre el hecho de que el universo «se expresa en el lenguaje de las matemáticas» está tomada de este libro. Galileo también había estado cultivando nuevas amistades en las altas esferas —uno de éstos, Francesco Barberini, perteneciente a una de las familias más poderosas de Roma,[11] se doctoró en la Universidad de Pisa en 1623—. En junio de aquel año, Galileo recibió una carta del cardenal Maffeo Barberini, tío de Francesco (y un hombre que anteriormente había dedicado, por escrito, grandes alabanzas a Galileo por sus logros científicos), dándole las gracias por la ayuda que había prestado a su sobrino. El tono de esta carta era más que amisto-

so. Los Barberini, decía el cardenal, «estarán siempre dispuestos a prestaros cualquier servicio». Dos semanas después de que esta carta fuera escrita, falleció Gregorio XV. Su sucesor electo fue el cardenal Maffeo Barberini, que adoptó el nombre de Urbano VIII y pronto, entre otras cosas, nombró cardenal a su sobrino Francesco. Con la misma celeridad y bastante más tacto político, los miembros de la Accademia dei Lincei se apresuraron a dedicar a Urbano VIII el libro *El aquilatador*, que estaba justamente a punto de imprimirse, y además adornaron la portada con el escudo de armas de los Barberini, en el que figuraban tres abejas. El Papa quedó muy complacido e hizo que se le leyera el libro en voz alta mientras tomaba sus comidas, partiéndose de risa con las pullas dedicadas a los jesuitas.

En la primavera de 1624, Galileo viajó a Roma para visitar a los dos Barberini. El Papa le concedió seis audiencias, le otorgaron una medalla de oro y otros honores (incluso una pensión vitalicia para su hijo Vincenzio), y el Papa escribió una carta a Fernando II en la que ponía a Galileo por las nubes. Pero el mejor de los premios fue el permiso del Papa para escribir un libro sobre los dos modelos del universo (o los dos sistemas del mundo, como se llamaban entonces): el modelo de Tolomeo y el de Copérnico. La única condición que se le impuso fue que tenía que exponer los dos modelos con imparcialidad, sin argumentar a favor del sistema copernicano y limitándose a dar argumentos astronómicos y matemáticos en ambos casos. Se le permitía «explicar» las teorías copernicanas, pero no estaba autorizado a «defenderlas».

Aunque Galileo había soñado durante mucho tiempo con escribir un libro así (y, en secreto, había comenzado a esbozar algunos capítulos), tardó en escribirlo casi tanto tiempo como en soñarlo. Además de sus continuos problemas de salud y una creciente debilidad, una de las razones no menos importantes por las que se distrajo fue que, por aquel tiempo, se dedicó al

trabajo pionero de diseñar un microscopio compuesto muy eficaz, con dos lentes talladas cada una con una forma convexa doble («en forma de lente», según el uso moderno de la expresión, en vez de ser planas por un lado y prominentes por el otro). Fue la dificultad de tallar este tipo de lente lo que había retrasado la invención del microscopio, y nada demuestra más fielmente la habilidad de Galileo en este oficio que su trabajo pionero en el campo de la microscopía (por la misma razón, aunque él a menudo lamentaba las dificultades existentes para obtener vidrio de la calidad necesaria para sus lentes, los telescopios de Galileo figuraron durante mucho tiempo entre los mejores del mundo en la época en que él vivió). Las primeras ilustraciones detalladas de insectos, realizadas a partir de las imágenes obtenidas por Galileo utilizando un microscopio, se publicaron en Roma en 1625, aunque se tardó un tiempo en percibir el auténtico impacto que produjo el nuevo instrumento y el papel de Galileo en este invento pasa desapercibido a menudo frente a la brillantez del resto de sus logros.

GALILEO PUBLICA EL «DIÁLOGO SOBRE LOS DOS SISTEMAS MÁXIMOS DEL MUNDO: TOLOMEICO Y COPERNICANO»

El libro de Galileo titulado *Diálogo sobre los dos sistemas máximos del mundo* (llamado habitualmente el *Diálogo*) quedó terminado en noviembre de 1629. Como su título indica, adoptó la forma de un debate imaginado entre dos personas, Salviati (defendiendo el sistema copernicano) y Simplicio (que daba argumentos a favor del sistema de Tolomeo). La utilización de un diálogo de este tipo era un recurso antiguo, que se remontaba a los antiguos griegos y, en principio, ofrecía un modo claro de enseñar teorías no convencionales (o, en este caso, heréticas), sin que el autor tuviera que aprobarlas al pie de la letra. Sin embargo, Galileo no siguió exactamente esta tradición. Había

existido en la realidad un Filippo Salviati, amigo íntimo de Galileo, que había muerto en 1614, y, al elegir este nombre para el interlocutor copernicano, Galileo se acercaba peligrosamente a identificarse él mismo con aquella visión del universo. También había existido un Simplicio (en realidad Simplicius), un hombre de la Grecia antigua que había escrito un comentario sobre la obra de Aristóteles, por lo que se podía alegar que este nombre era adecuado para el defensor de Tolomeo (y de Aristóteles) en el *Diálogo*. También se podría decir que este nombre sugiere que sólo un simple creería que el sistema de Tolomeo era correcto. La tercera «voz» en este libro era la que aportaba Sagredo, llamado así por otro viejo amigo de Galileo, Gianfrancesco Sagredo, que había fallecido en 1620. Se supone que Sagredo era un comentarista imparcial, que escuchaba el debate entre Salviati y Simplicio, planteando cuestiones para que fueran debatidas —pero este personaje tendía cada vez más a apoyar a Salviati frente a Simplicio.

A pesar de esto, al principio parecía que todo iba bien con respecto al libro. Con el fin de conseguir la aprobación oficial para su publicación, el libro tenía que ser examinado por un censor en Roma, y el hombre elegido para esta tarea, Niccolo Riccardi, un fraile dominicano, era precisamente el censor que había aprobado *El aquilatador* sin exigir ningún cambio. En mayo de 1630, Galileo entregó el manuscrito a Riccardi en Roma, pero en junio tuvo que volver a su casa, porque el brote de una epidemia que se propagaba hacia Italia amenazaba con alcanzar Florencia e interrumpir las comunicaciones. El libro recibió un «imprimatur» condicional; Riccardi deseaba que se añadiera al libro un nuevo prólogo y un nuevo epílogo en los que se dijera que la postura copernicana se presentaba sólo como una hipótesis, pero estaba conforme con el manuscrito en su conjunto y, dadas las circunstancias, dio permiso a Galileo para que regresara a su casa. Riccardi y sus colegas harían los cambios y luego

se los enviarían a Galileo para que los incluyera en el libro. Cuando estos añadidos llegaron a Florencia, la carta de Riccardi contenía la siguiente frase: «el autor puede modificar o embellecer la redacción, siempre que se mantenga lo sustancial». Galileo tomó esto al pie de la letra, lo cual resultó ser una gran equivocación.

Además de la epidemia, hubo otras dificultades que afectaron a la publicación del libro. La impresión tenía que haber sido realizada por la Accademia dei Lincei en Roma. Sin embargo, la muerte del príncipe Frederico Cesi, que estaba al frente de los «linces», en agosto de 1630, generó la confusión en todos los asuntos de esta institución (en parte porque había estado financiando sus actividades) y la Iglesia dio su permiso para que la impresión se llevara a cabo en Florencia. En gran medida por culpa de las dificultades causadas por la plaga, que se propagó trastornando todas las actividades normales, la impresión del *Diálogo* no comenzó hasta junio de 1631, y hasta marzo de 1632 no hubo ejemplares completos a la venta en Florencia. Se envió inmediatamente unos pocos ejemplares a Roma —la primera persona que recibió uno de éstos fue el cardenal Francesco Barberini, el sobrino del Papa, que escribió a Galileo para decirle lo mucho que había disfrutado con el libro. Pero otros no se sintieron tan complacidos.

En el *Diálogo*, una vez más, Galileo suscitaba el debate sobre las manchas solares, y, de nuevo, no pudo resistirse a lanzar unas cuantas pullas contra Scheiner, con lo cual consiguió que el viejo jesuita y sus colegas se enfurecieran. Además estaba la cuestión del material adicional que había aportado el censor. Galileo había incluido el prólogo con un tipo de letra diferente del que utilizaba en el resto del libro, indicando así claramente que no representaba sus propios puntos de vista. Por otra parte, las palabras finales con las que se descartaba el sistema copernicano, considerándolo como una mera hipótesis (esencial-

mente las palabras del Papa, transmitidas a través del padre Riccardi), se ponían en boca de Simplicio. Sinceramente, no hay otro personaje en el libro que pueda decir estas palabras, ya que Sagredo termina tomando partido por Salviati. Pero, se sugirió a Su Santidad que Galileo lo había hecho deliberadamente, para dar a entender que el propio Urbano VIII era un simple, y esto enfureció al Papa, quien más tarde diría sobre Galileo: «No temía burlarse de mi».[12] El resultado fue que se constituyó una comisión papal para investigar el asunto. Rebuscando en los archivos en busca de algo que pudieran encontrar sobre Galileo, los jesuitas dieron con lo que parecía ser una prueba condenatoria: las actas no firmadas de la reunión de 1616, donde se decía que Galileo había recibido instrucciones en el sentido de que debía abstenerse de «sostener, defender y *enseñar*» la teoría copernicana del universo. Esta fue la prueba decisiva que hizo que Urbano VIII llamara a Galileo a Roma para someterle a un juicio por herejía —por publicar un libro que había sido aprobado por el censor oficial y había recibido el «imprimatur»—. El Papa intentó también detener la distribución del libro, pero era ya demasiado tarde, dado que la impresión se había llevado a cabo en Florencia.

GALILEO SE RETRACTA, DESPUÉS DE SER AMENAZADO CON LA TORTURA

Para retrasar el viaje a Roma, Galileo alegó como impedimentos su avanzada edad y su enfermedad (de hecho, estaba enfermo una vez más), sabiendo qué implicaba aquel tipo de invitación, como lo había sabido también su amigo Paolo Sarpi (que había fallecido en 1623). Intentó asimismo conseguir el apoyo político del Estado de Toscana para mantener a raya a la Inquisición, sin embargo, aunque en 1629 Fernando II había asumido formalmente sus funciones como Gran Duque, a la

edad de 19 años, su juventud y su inexperiencia hacían que Toscana no pudiera ofrecer a Galileo el mismo nivel de ayuda que Venecia había ofrecido a Sarpi en su momento.

La verdad es que, cuando Galileo llegó finalmente a Roma, el 13 de febrero de 1633, recibió un buen trato, en comparación con el que solían recibir otros huéspedes de la Inquisición. Aunque, debido a la cuarentena, había tenido que esperar durante tres agotadoras semanas en la frontera de Toscana (esto indica hasta qué punto la epidemia alteraba las comunicaciones), una vez que llegó a Roma se le permitió, al principio, alojarse en la Embajada de Toscana. Incluso cuando comenzó el juicio, en el mes de abril, estuvo alojado en un cómodo conjunto de habitaciones (al menos su estancia habría sido confortable de no ser por sus dolores artríticos que le hacían lamentarse continuamente noche tras noche), en vez de ser arrojado a un malsano y húmedo calabozo. El juicio al que se vio sometido Galileo se ha descrito ya muchas veces y con todo detalle, por lo que no es necesario que lo reflejemos aquí. Sin embargo, para dejar claro lo poco que tenía la acusación para ir contra Galileo, mencionaremos que entre sus supuestos «crímenes» se incluía el hecho de que había escrito en italiano, en vez de hacerlo en latín, de tal forma que las personas menos cultivadas pudieran comprender sus palabras, y que había escrito un elogio de la obra de William Gilbert, un «hereje perverso, un pendenciero y sofisticado defensor de Copérnico». Pero, la cuestión fundamental era si Galileo había desobedecido la orden del Papa de no enseñar el sistema copernicano en ningún caso. En relación con esta cuestión, las actas no firmadas correspondientes a la reunión de 1616, que eran la baza de los jesuitas, quedaron sin valor cuando Galileo presentó el documento firmado que el cardenal Bellarmine había escrito de su puño y letra, en el que se establecía que Galileo no podría «ni sostener, ni defender» aquellas teorías, pero en absoluto estaba más obli-

gado que cualquier otro miembro de la Iglesia Católica. Sin embargo, ningún acusado se le escapaba a la Inquisición y, una vez que había empezado aquel juicio espectacular, el único veredicto concebible era alguno en el que se declarase a Galileo culpable de algo, con el fin de aplicarle un castigo que sirviera de advertencia para otros. Desde el punto de vista de la Inquisición, el problema era que presentar un falso cargo de herejía era un crimen tan grave como la herejía misma. Si Galileo no era culpable, entonces lo eran sus acusadores —y esos acusadores eran las máximas autoridades de la Iglesia Católica—. En consecuencia, había que obligar a Galileo a confesarse culpable de algo.

Fue necesario todo un ejercicio de persuasión por parte del cardenal Barberini, que actuó defendiendo los intereses de Galileo hasta el final, para hacer que el anciano se diera cuenta de que realmente tenía que confesar, incluso sin ser culpable, o los torturadores empezarían a trabajar. Finalmente, Galileo comprendió cuál era su verdadera situación e hizo la famosa declaración en la que afirmaba no creer en el sistema copernicano y confesó que su error había sido ir demasiado lejos al defender las teorías de Copérnico en su libro, cosa que había hecho por un sentimiento de orgullo que estaba fuera de lugar, queriendo demostrar su habilidad para presentar dichas teorías de un modo plausible (y sólo con fines didácticos). Yo «abjuro, maldigo y aborrezco mis errores», declaró Galileo. Tenía 69 años, sufría dolores por su artritis crónica y le aterrorizaba la perspectiva de ser torturado. No hay pruebas en absoluto de que pronunciara las famosas palabras *eppur, si muove* («sin embargo, se mueve»); si lo hubiera hecho, y le hubiesen oído, habría terminado en el potro de tortura o en la hoguera (probablemente en ambos). Los jesuitas obtuvieron públicamente su victoria y todo lo que quedaba por hacer era dictar la sentencia: cadena perpetua. En realidad, sólo siete de los diez cardenales que for-

maban el tribunal de la Inquisición firmaron la sentencia, siendo Barberini uno de los tres que se negaron a hacerlo.

Aunque la sentencia se cumplió, gracias a Barberini las condiciones fueron haciéndose gradualmente menos duras. Primero fue un arresto domiciliario en la embajada de Toscana en Roma, luego pasó Galileo a estar bajo la custodia del arzobispo de Siena (que simpatizaba con él) y finalmente todo quedó en el confinamiento del anciano en su propio domicilio cerca de Arcetri, desde principios de 1634. Poco después de que Galileo regresara a su casa por última vez (no se le permitía salir de Arcetri ni siquiera para acudir a sus médicos en Florencia, aunque se le dio autorización para visitar el convento), falleció su hija María Celeste, el 2 de abril de 1634 (su hermana, Arcangela, sobrevivió a Galileo, muriendo el 14 de junio de 1659).

GALILEO PUBLICA «DOS CIENCIAS NUEVAS»[*]

Aislado en Bellosguardo,[13] Galileo terminó el más importante de todos sus libros, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas* (denominado habitualmente *Dos ciencias nuevas*), que recopilaba todos sus trabajos sobre mecánica, inercia y péndulos (es decir, la ciencia de los objetos en movimiento), sobre la fuerza de los cuerpos (la ciencia de los objetos que no se mueven), así como la descripción del método científico. Aplicando el análisis matemático a temas cuyo estudio hasta entonces había sido prerrogativa de los filósofos, *Dos ciencias nuevas* fue el primer texto científico moderno, en el que se explicaba que el universo está gobernado por leyes que la mente humana puede comprender y está sometido a fuerzas cuyos efectos se pueden calcular utilizando las matemáticas. El manuscrito se sacó clandestinamente de Italia y Louis Elzevir lo imprimió en Leiden en 1638. Este libro tuvo una enorme influencia en el desarrollo de la ciencia en Europa durante las dé-

cadas siguientes, una influencia mayor incluso que la producida por el *Diálogo,* que se había traducido a muchos idiomas. Al decir que su influencia fue enorme, nos referimos a todos los países excepto Italia; como resultado directo de la condena de las obras de Galileo por parte de la Iglesia de Roma, desde la década de 1630 Italia, que había sido escenario del primer florecimiento de la cultura renacentista, se quedó atrasada en todo lo relativo a la investigación del modo en que funciona el universo.

MUERTE DE GALILEO

En la época en que se publicó *Dos ciencias nuevas,* Galileo se había quedado ciego. Pero, incluso después de esta desgracia, continuó trabajando e inventó un escape para los relojes de péndulo, que explicó a su hijo Vincenzio, quien de hecho construyó un reloj con este mecanismo después de morir Galileo. Unos relojes similares se difundieron por Europa a finales del siglo XVII, pero su construcción se basaba en los trabajos realizados independientemente por Christiaan Huygens. A partir de finales de 1638, Galileo tuvo a Vincenzo Viviani como ayudante —trabajó como escribiente de Galileo y escribiría más tarde su primera biografía, difundiendo muchas de las leyendas que dan color a la visión popular del gran maestro que existe actualmente. Galileo murió tranquilamente mientras dormía durante la noche de 8 al 9 de enero de 1642, unas pocas semanas antes del día en que habría cumplido 78 años. Justo dos años antes, en 1640, el francés Pierre Gassendi (1592-1655) había llevado a cabo un experimento definitivo para comprobar la naturaleza de la inercia: pidió prestada una galera de la armada francesa (el medio de transporte más rápido que existía en aquel tiempo) y la hizo avanzar movida por los remos por el Mediterráneo, estando el mar en calma, mientras se dejaba caer

una serie de bolas desde lo más alto del mástil a la cubierta. Todas las bolas cayeron al pie del mástil; ninguna se quedó atrás a causa del movimiento de la galera.

Gassendi estuvo fuertemente influido por los escritos de Galileo, y éste es un ejemplo de cómo influyó la revolución que Galileo, más que ningún otro, ocasionó en la investigación del universo, introduciendo el procedimiento de comprobar las hipótesis realizando experimentos, en vez de dar paseos discutiendo las teorías en términos puramente filosóficos. Desde esta perspectiva, merece la pena tomar nota de una ocasión en que Galileo se equivocó —precisamente porque fue un caso en que tuvo que hacer una extrapolación filosofando a partir de experimentos conocidos, ya que en aquella época no había un modo factible de comprobar sus hipótesis definitivas mediante experimentos—. Haciendo que unas bolas rodaran hacia abajo por planos inclinados y dejando que luego subieran rodando por otro plano, Galileo constató que, en ausencia de rozamiento, cada bola subiría a una altura igual a aquella de la que había partido anteriormente para descender, independientemente de lo pronunciada o ligera que fuese la inclinación de los planos. En sí misma ésta es una constatación fundamental, sobre todo porque Galileo fue el primer científico que captó y comprendió plenamente la idea de que nuestros experimentos siempre son una representación imperfecta del mundo idealizado en que se mueve la ciencia pura —el rozamiento siempre está presente en el mundo real, pero eso no impide que los científicos averigüen cómo se comportarían los objetos en ausencia de rozamiento, aunque luego, cuando sus modelos se vuelven más sofisticados, añaden *a posteriori* la posibilidad de tener en cuenta que existe el rozamiento—. En los siglos posteriores a Galileo, esta idea se convirtió en una característica normalmente asumida dentro del planteamiento científico —descomponer sistemas complejos en componentes simples siguiendo reglas idealizadas y,

cuando fuera necesario, aceptar que habría errores en las predicciones de estos modelos simples, ocasionados dichos errores por complicaciones que quedarían fuera del alcance de estos modelos. Eran precisamente estas complicaciones (el viento, la resistencia del aire, etc.), como también constató Galileo, las que producían las pequeñas diferencias en los tiempos de llegada de las dos bolas al suelo, cuando se llevaba a cabo el experimento de la Torre Inclinada de Pisa en condiciones reales.

Sin embargo, Galileo supo ver una profunda verdad en los experimentos del plano inclinado. A continuación, se puso a pensar qué sucedería si se colocaba el segundo plano inclinado de forma que tuviera cada vez menos pendiente. Cuanto menor fuera dicha pendiente, la bola tendría que rodar más lejos para llegar a su altura inicial. Si el segundo plano fuera horizontal, y se pudiera ignorar el rozamiento, la bola rodaría eternamente hacia el horizonte.

Galileo había constatado así que los objetos en movimiento tienen una tendencia natural a seguir moviéndose, salvo que se vean afectados por el rozamiento o por alguna otra fuerza exterior. Este sería un componente clave en el desarrollo pleno de la mecánica llevado a cabo siguiendo las teorías de Isaac Newton. Sin embargo, había una imperfección en la obra de Galileo. Sabía que la Tierra era redonda. Por lo tanto, el movimiento horizontal (un movimiento hacia el horizonte) significa en realidad seguir una trayectoria curva alrededor de la superficie curva de la Tierra. Galileo pensó que el significado de esto era que el movimiento por inercia, sin que actuara ninguna fuerza externa, debía consistir básicamente en un movimiento circular, y le pareció que esto explicaba por qué los planetas describían órbitas alrededor del Sol. Fue René Descartes, una figura clave durante las décadas que transcurrieron entre Galileo y Newton, el primero que constató que cualquier objeto en movimiento tiende, como resultado de la inercia, a seguir movién-

dose en línea recta, salvo que actúe sobre él alguna fuerza. Galileo había establecido los fundamentos de la ciencia y había indicado el camino que otros podían seguir; pero a estos otros les quedaba mucho por hacer para continuar desarrollando dichos fundamentos. Hemos llegado al momento oportuno para examinar más de cerca la obra de Descartes y las de otros científicos que siguieron construyendo sobre los fundamentos establecidos por Galileo.

Segunda Parte

LOS PADRES FUNDADORES

Capítulo 4

LA CIENCIA ENCUENTRA SU FUNDAMENTO

La ciencia se escribe en el lenguaje de las matemáticas, como constató Galileo. Pero este lenguaje estaba lejos de haber llegado a su desarrollo pleno en la época de Galileo, y el lenguaje simbólico que hoy en día reconocemos automáticamente como matemáticas —el lenguaje de fórmulas tales como $E = mc^2$ y el modo en que podemos expresar las curvas geométricas mediante funciones— tuvo que ser inventado antes de que los físicos pudieran utilizar ampliamente las matemáticas para describir el mundo en que vivimos. Los símbolos + y – no se introdujeron en las matemáticas hasta 1540, en un libro del matemático Robert Recorde, titulado *The Grounde of Artes* (*Los fundamentos de las artes*). Recorde nació en Tenby, en Pembrokeshire, en alguna fecha próxima a 1510, y estudió en la Universidad de Oxford y en la Universidad de Cambridge, obteniendo las titulaciones correspondientes de matemáticas y medicina. Tenía mucho de polifacético, ya que fue miembro de la dirección del All Souls College de Oxford, médico de Eduardo VI y de la reina María, y, durante algún tiempo, ejerció como inspector general de minas y moneda para la Corona. En otro libro suyo, *Whetstone of Witte* (*La piedra de afilar de Witte*), publicado en 1557, introdujo el signo de la igualdad (=), eligiendo esta grafía

«porque no hay dos cosas que puedan ser más iguales» que dos paralelas de la misma longitud. Todos estos logros no le libraron de un final desgraciado —Recorde murió en una prisión para morosos en 1558 (el año en que Isabel I llegó al trono)—. Sin embargo, sus obras sobre matemáticas se utilizaron como textos de referencia durante más de cien años, incluso después de la muerte de Galileo.[1]

Como dijo John Aubrey más de un siglo después, Recorde «fue el primero que escribió un buen tratado de aritmética en inglés» y «el primero que escribió sobre astronomía en lengua inglesa».

Como ya hemos mencionado, el invento (o descubrimiento) de los logaritmos a principios del siglo XVII simplificó y agilizó enormemente el laborioso proceso de realizar cálculos aritméticos que realizaban los astrónomos y otros científicos —se trata del sistema que incluye el manejo de las «potencias de diez» en vez de números ordinarios; por poner un ejemplo muy sencillo, 100 × 1000 se convierte en $10^2 \times 10^3$, que (como 2 + 3 = 5) es igual a 10^5 o 100 000—. Todos los números ordinarios se pueden representar de esta manera: por ejemplo, 2345 se puede escribir como $10^{3,37}$, de tal modo que el logaritmo decimal de 2345 es 3,37. Esto significa que la multiplicación y la división se pueden reducir a la adición y la sustracción (gracias a que alguien ha asumido la laboriosa tarea de preparar unas tablas de logaritmos. En la época en que no existían las calculadoras de bolsillo (es decir, hasta la década de 1970), los logaritmos y el instrumento asociado a ellos, la regla del cursor, eran lo único que hacía que los cálculos complicados fueran factibles para la mayoría de las personas.

No pretendemos en este libro contar con todo detalle la historia de las matemáticas, salvo cuando intervenga directamente en la historia de cómo se fue comprendiendo el modo en que funciona el mundo y el lugar que ocupamos en él. Pero hay

otro avance importante que fue publicado mientras Galileo estaba todavía cumpliendo la sentencia que le había impuesto la Inquisición. Dicho avance no sólo es demasiado importante para omitirlo, sino que es adecuado para acercamos a otra figura clave de la época, René Descartes, un personaje ampliamente conocido hoy en día como filósofo, pero que también tuvo intereses en el ámbito científico.

Rene Descartes y las coordenadas cartesianas

Descartes nació en La Haya, en Bretaña, el 31 de marzo de 1596. Procedía de una familia local prominente y moderadamente rica —su padre, Joachim, fue jurista y consejero del Parlamento británico—. Además, aunque la madre de René Descartes falleció poco después de que éste hubiera nacido, le dejó una herencia suficiente para garantizar que su hijo nunca moriría de hambre, aunque tampoco le haría rico: sencillamente, podría elegir cualquier carrera que le gustara (o ninguna), sin tener que preocuparse del dinero. Sin embargo, existían circunstancias reales para pensar que no viviría lo suficiente para hacer una carrera, fuera cual fuese —René era un niño enfermizo, que podía no haber llegado a la edad adulta, y a menudo sufrió achaques durante su vida posterior—. Cuando tenía alrededor de 10 años de edad (posiblemente un poco antes), su padre lo envió al Jesuit College que se acababa de fundar en La Fléche, en Anjou. Esta era una de las diversas instituciones educativas que Enrique IV, el primer Borbón que fue rey de Francia (conocido también como Enrique de Navarra), había permitido crear a los jesuitas en aquella época.

La propia carrera de Enrique de Navarra (suponiendo que se pueda llamar «carrera») es un ejemplo de la agitación que sacudía a Europa en aquel momento. Antes de convertirse en rey había sido el líder del movimiento protestante (hugonote) en

las guerras de religión francesas, una serie de conflictos que duraron desde 1562 hasta 1598. Tras sufrir una importante derrota en 1572, conocida como la matanza de la noche de San Bartolomé, Enrique de Navarra se convirtió al catolicismo para salvar su vida. Sin embargo, fue encerrado en prisión por el rey de Francia (Carlos IX y luego su sucesor, Enrique III), que dudaba de la sinceridad de esta decisión. En 1576 se fugó y negó su conversión, poniéndose al frente de un ejército que participó en varias sangrientas batallas durante las guerras civiles. Enrique de Navarra, que inicialmente estaba bastante lejos en la línea de sucesión al trono de Francia, se convirtió en príncipe heredero en 1584, cuando murió el hermano de Enrique III, el duque de Anjou (tanto Enrique III como el duque murieron sin haber tenido hijos). Esta situación indujo a la Liga Católica a reconocer como heredera de la corona de Francia a la hija de Felipe II de España, un rey que había luchado en la guerra durante mucho tiempo defendiendo la causa de los católicos. Sin embargo, el tiro le salió por la culata, ya que Enrique III y Enrique de Navarra unieron sus fuerzas para aplastar a la Liga e impedir que España se hiciera con el trono de Francia. Enrique III murió apuñalado por un asesino el 1 de agosto de 1589, mientras participaba en el sitio de París junto con Enrique de Navarra, pero vivió lo suficiente para confirmar a este último como su heredero. Debido a que la lucha se prolongó, Enrique IV no fue coronado hasta 1594, un año después de que se hubiera declarado de nuevo católico, pero incluso entonces continuó el conflicto con España. Las guerras terminaron finalmente en 1598, el año en que Enrique IV hizo las paces con España y, por otra parte, firmó el edicto de Nantes, que daba a los protestantes el derecho a practicar el culto como ellos quisieran —una excelente combinación de acontecimientos—. El propio Enrique IV murió también a manos de un asesino, en 1610, cuando René Descartes tenía 14 años de edad. Su mejor epitafio es algo

que él mismo dijo: «Aquellos que siguen lo que les dictan sus conciencias son de mi religión, y yo pertenezco a la religión de aquellos que son valientes y buenos».

Dos años después de la muerte de Enrique IV (o posiblemente en 1613; los documentos no lo indican claramente), Descartes dejó el Jesuit College y vivió durante algún tiempo en París, antes de estudiar en la Universidad de Poitiers, donde obtuvo la titulación de leyes en 1616 (es posible que estudiara también medicina, pero nunca obtuvo el título). A los 20 años de edad, Descartes reflexionó sobre lo que deseaba ser en la vida y decidió que no le interesaba hacer carrera dentro de las profesiones al uso. Sus enfermedades de la infancia habían contribuido a hacer de él una persona segura de sí misma, aunque al mismo tiempo fuera un soñador. Además, amaba las comodidades materiales. Incluso los jesuitas habían sido con él sumamente indulgentes, al permitirle, por ejemplo, que se levantara tarde por la mañana, lo cual se convirtió no sólo en un hábito, sino más bien en un modo de vida para Descartes. Sus años de estudiante le sirvieron sobre todo para convencerse de su propia ignorancia y de la ignorancia de sus profesores, por lo que decidió dejar a un lado los libros de texto y desarrollar su propia filosofía y sus conocimientos científicos, estudiándose a sí mismo e investigando por su cuenta el mundo que le rodeaba.

Con este propósito, adoptó lo que a primera vista podría parecer una decisión bastante extraña, levantando el campamento y trasladándose a Holanda, donde se enroló en el ejército al servicio del príncipe de Orange. Pero Descartes, amante de las comodidades, no quería participar en combates como un soldado, por lo que el puesto donde podía encajar mejor era el de ingeniero, utilizando sus conocimientos matemáticos, mucho más desarrollados que su capacidad física para la acción. Mientras estaba en la Escuela Militar de Breda, Descartes conoció al matemático Isaac Beeckman, de Dordrecht, que le dio a conocer

temas de matemáticas de nivel superior y ambos entablaron una amistad duradera. No se sabe mucho sobre la vida militar que llevó Descartes durante los años siguientes, salvo que prestó sus servicios en varios ejércitos europeos, incluido el del duque de Baviera, aunque sí sabemos que estuvo presente en la coronación del emperador Fernando II en Frankfurt, el año 1619. Hacia finales de aquel año, sin embargo, tuvo lugar el acontecimiento más importante de la vida de Descartes, y sabemos exactamente cuándo y dónde sucedió porque nos lo dice en su libro *Discurso del método* —cuyo título completo es *Discours de la Méthode pour bien conduire la raison et chercher la Vérité dans les Sciences* (*Discurso del método para conducir bien a la razón y buscar la verdad en las ciencias*)— publicado en 1637. Era el 10 de noviembre de 1619 y el ejército del duque de Baviera (reclutado para luchar contra los protestantes) estaba en sus cuarteles de invierno a orillas del Danubio. Descartes pasó todo el día cómodamente arropado en la cama, soñando (más bien soñando despierto) sobre la naturaleza del mundo, el significado de la vida, y cosas por el estilo. La habitación en la que se encontraba se menciona a veces como un «horno», que es la traducción literal de la expresión utilizada por Descartes, pero no significa necesariamente que se hubiera metido, en sentido literal, en algún tipo de recinto caliente destinado a operaciones tales como cocer el pan, ya que esta expresión podría ser metafórica. En cualquier caso, fue aquel día cuando Descartes descubrió por primera vez una vía hacia su propia filosofía (que queda, con mucho, fuera del alcance de este libro) y también tuvo una de las más grandes ideas matemáticas de todos los tiempos.

Mientras observaba distraídamente el vuelo de una mosca por un rincón de la habitación, Descartes se dio cuenta repentinamente de que la posición de la mosca en cualquier momento se podía representar mediante tres números que expresaran las

distancias desde dicha posición a cada una de las tres paredes que concurrían en aquel rincón. Aunque él lo vio por primera vez en términos tridimensionales, la naturaleza de su idea resulta actualmente familiar para cualquier escolar que haya dibujado alguna vez una representación gráfica. Cualquier punto de una gráfica en el plano se representa mediante dos números, correspondientes a la distancia medida paralelamente el eje *x* y a la distancia medida paralelamente al eje *y*. En tres dimensiones no hay más que añadir un eje *z*. Los números que se utilizan en el sistema de representación de puntos en el espacio (o en una hoja de papel) se conocen hoy en día como coordenadas cartesianas, en honor a Descartes. Cuando damos a alguien instrucciones para encontrar un lugar en una ciudad diciéndole algo así como «camine tres manzanas hacia el este y luego dos hacia el norte», estamos utilizando coordenadas cartesianas, y si además queremos indicar el piso en un edificio, estamos haciendo lo mismo en tres dimensiones. El descubrimiento de Descartes implica que cualquier forma geométrica se puede representar sencillamente mediante un conjunto de números — en el caso, nada complicado, de un triángulo dibujado sobre papel para gráficos, basta con dar tres pares de números, uno para cada vértice del triángulo. Cualquier línea curva que tracemos sobre un papel (o, por ejemplo, la órbita de un planeta alrededor del Sol) se puede representar también, en principio, mediante una serie de números relacionados entre sí por una expresión matemática. Este descubrimiento, cuando quedó desarrollado del todo y fue finalmente publicado, transformó las matemáticas, haciendo que la geometría se pudiera analizar utilizando el álgebra, con unas repercusiones que no dejaron nunca de tener eco en los siglos siguientes, llegando hasta el desarrollo de la teoría de la relatividad y de la teoría cuántica en el siglo XX. Además, fue Descartes quien introdujo el convenio de utilizar las primeras letras del alfabeto (*a, b, c...*) para re-

presentar cantidades conocidas (o determinadas), y las últimas letras (especialmente *x, y, z*) para representar cantidades desconocidas. También fue él quien introdujo la notación exponencial que ahora nos resulta tan familiar, según la cual x^2 significa $x \cdot x$, x^3 es $x \cdot x \cdot x$, y así sucesivamente. Aunque no hubiera hecho más cosas, el hecho de haber establecido estos fundamentos para el análisis matemático habría sido suficiente para convertir a Descartes en una figura clave de la ciencia del siglo XVII. Pero no fue esto lo único que hizo.

Después de haber tenido estas ideas en el «horno», en 1620 Descartes renunció a proseguir la carrera militar, al finalizar su servicio con el duque de Baviera, y viajó a través de Alemania y Holanda hacia Francia, adonde llegó en 1622, y vendió la propiedad que había heredado de su madre en Poitiers, invirtiendo el dinero de esta venta para que le permitiera continuar sus estudios de manera independiente. Con su situación económica asegurada, pasó varios años viajando por Europa y dedicándose más bien a pensar. Estos viajes incluyeron una estancia bastante larga en Italia (donde, curiosamente, parece que no intentó en ningún momento conocer a Galileo). Después, a los 32 años de edad, decidió que había llegado el momento de establecerse en un lugar y dedicarse a expresar sus pensamientos de una forma coherente para la posteridad. Visitó de nuevo Holanda en el otoño de 1628, pasó el invierno de 1628-1629 en París, volviendo luego a Holanda, donde pasó los veinte años siguientes. Esta elección fue acertada. La guerra de los Treinta Años seguía agitando el centro de Europa, y las guerras de Religión continuaban retumbando en Francia, aflorando a la superficie de vez en cuando, pero Holanda era ya independiente y gozaba de seguridad; aunque oficialmente era un país protestante, los católicos constituían una gran parte de la población y existía una buena tolerancia religiosa.

En Holanda, Descartes tenía un amplio círculo de amigos y de personas con las que mantenía correspondencia, entre los que figuraban: Isaac Beeckman y otros académicos; Constantijn Huygens, poeta y hombre de Estado holandés (padre de Christiaan Huygens), que era secretario del príncipe de Orange; y la familia del elector palatino del Rin, Federico V. Esta última relación sugiere, en cierto sentido, un vínculo entre Descartes y Tycho Brahe, ya que la princesa Isabel, esposa de Federico V, era hija de Jacobo I de Inglaterra.[2] Al igual que Galileo, Descartes nunca se casó, aunque, como escribió John Aubrey, «puesto que era un hombre, tenía los deseos y apetitos propios de un hombre; por consiguiente, mantuvo relaciones con una bella mujer de buena posición que era de su agrado». El nombre de esta dama era Héléne Jans, y tuvieron una hija, Francine, nacida en 1635, a la que Descartes adoraba, pero que murió en 1640.

Obras más importantes de Descartes

Mientras reforzaba su ya bien consolidada reputación como pensador y hombre de estudios en conversaciones y correspondencia con estos amigos, Descartes pasó cuatro años, de 1629 a 1633, preparando un enorme tratado en el que intentaba exponer todas sus ideas sobre física. La obra se tituló *Le Monde, ou Traité de la Lumière* (*El mundo, o Tratado sobre la luz*), y estaba a punto de ser publicada cuando llegó a Holanda la noticia del juicio al que estaban sometiendo a Galileo y la condena de éste por herejía. Aunque la historia completa del juicio no se aclaró hasta pasado cierto tiempo, lo que sí se veía claro en aquel momento era que Galileo había sido condenado por sus ideas copernicanas, y el manuscrito de Descartes apoyaba en gran medida las teorías de Copérnico. Descartes detuvo inmediatamente la edición y el libro nunca llegó a publicarse, aunque el autor

utilizó gran parte de su contenido como base para algunas obras posteriores. Aun admitiendo que Descartes fuera católico, su reacción parece haber sido bastante precipitada y exagerada, ya que los jesuitas de Roma nada podían hacer para perjudicarle en la lejana Holanda, y sus amigos, muchos de los cuales habían leído parte de la obra o habían recibido información sobre ella en las cartas que les enviaba Descartes, no tuvieron que insistir mucho para convencerle de que publicara algo cuanto antes. Lo primero fue el *Discurso del método,* que apareció en 1637, acompañado por tres ensayos, uno sobre meteorología, otro sobre óptica y el tercero sobre geometría. Aunque no todas las teorías que exponía eran correctas, lo importante en el ensayo sobre meteorología es que intentaba explicar todo el funcionamiento del tiempo atmosférico en forma de ciencia racional, y no recurriendo a lo oculto o al capricho de los dioses. El ensayo dedicado a la óptica explica el funcionamiento del ojo y plantea maneras de mejorar el telescopio. El ensayo sobre geometría trata sobre el revolucionario punto de vista que surgió aquel día que Descartes pasó en la cama a orillas del Danubio.

La segunda gran obra de Descartes, *Meditationnes de Prima Philosophia,* apareció en 1641 y en ella se elaboraba la filosofía construida en torno la idea más famosa (aunque no siempre correctamente interpretada) de Descartes: «Pienso, luego existo». En 1644 realizó su tercera contribución importante en el campo del saber, *Principia Philosophiae* (*Principios de la filosofía),* que era esencialmente un libro de física, en el que Descartes investigaba la naturaleza del mundo material y hacía la interpretación correcta de la inercia, según la cual los objetos que están en movimiento tienden a continuar su movimiento en línea recta, y no (como había pensado Galileo) describiendo un círculo. Cuando este libro extraordinario estaba ya publicado, Descartes hizo el que parece haber sido su primer viaje a Fran-

cia desde 1629, y volvió allí de nuevo en 1647 —una visita significativa, ya que en aquella ocasión conoció al físico y matemático Blaise Pascal (1623-1662), y sugirió a este joven Pascal que sería interesante llevar un barómetro a la cima de una montaña y ver cómo varía la presión con la altitud—.[3] Cuando se realizaron los experimentos (se encargó de ellos el cuñado de Pascal en 1648), éstos demostraron que la presión atmosférica desciende cuando la altitud aumenta, lo que sugiere que sólo existe una fina capa de aire alrededor de la Tierra y que la atmósfera no se extiende hasta el infinito. Otra visita a Francia, en 1648, fue breve por la amenaza de guerra civil, pero actualmente se ve claro que, a finales de la década de 1640, Descartes, que contaba ya 52 años de edad en 1648, estaba intranquilo por la razón que fuera y no parecía decidido a pasar el resto de su vida en Holanda. En consecuencia, en 1649, cuando la reina Cristina de Suecia le invitó a unirse al círculo de intelectuales que ella había reunido en Estocolmo, Descartes aprovechó la oportunidad. Llegó a la capital de Suecia en octubre de aquel año, pero se quedó horrorizado al descubrir que, a cambio de los favores que le serían concedidos y de la libertad de poder pasar la mayor parte del tiempo trabajando en lo que quisiera, se le pedía que visitara a la reina cada día a las 5 de la madrugada para darle clases particulares antes de que ella comenzara su jornada dedicada a los asuntos de Estado. La combinación de los rigores del invierno en el norte con el hecho de madrugar tanto a diario fue demasiado para el cuerpo de Descartes, que amaba las comodidades. Cogió un resfriado que se complicó con una neumonía, y esta enfermedad acabó con su vida el 11 de febrero de 1650, poco antes de que el filósofo y científico cumpliera cincuenta y cuatro años.

La influencia de Descartes fue muy profunda, y su mayor importancia radica en el hecho de que supiera desterrar de su pensamiento todo vestigio de fuerzas místicas (aunque creía en

Dios y en el alma) e insistiera en que tanto el mundo en que vivimos, como todas las criaturas materiales que lo habitan (incluidos nosotros), pueden entenderse como entidades físicas básicas que obedecen leyes susceptibles de ser determinadas mediante experimentos y observaciones. Esto no quiere decir que todo lo que Descartes hizo fuera correcto, en absoluto, ya que una de sus teorías más importantes estaba equivocada, y sin embargo fue tan influyente que retrasó el avance científico en varias zonas de Europa (especialmente en Francia) durante décadas, hasta bien entrado el siglo XVIII. Conviene examinar este paso en falso antes de comentar la influencia de Descartes en otras áreas en las que tuvo más aciertos que equivocaciones.

Pierre Gassendi: átomos y moléculas

El asunto importante en que Descartes se equivocó fue su rechazo a la idea de *vacuum* o vacío. Esto le indujo, además, a descartar el concepto de átomo, que estaba resurgiendo en aquella época gracias a los trabajos de Pierre Gassendi. El motivo de este rechazo se debía a que el modelo atómico del mundo considera que todo está formado por pequeños objetos (los átomos) que se mueven en el vacío y ejercen interacciones unos con otros. Aunque la idea del átomo se remontaba a la obra de Demócrito en el siglo V a. C., y fue retomada por Epicuro, que vivió desde alrededor del 342 a. C. hasta aproximadamente el año 271 a. C., nunca llegó a ser más que un concepto apoyado por una minoría en la Grecia antigua. Aristóteles, el filósofo griego más influyente en cuanto al impacto que produjo en el pensamiento occidental antes de la revolución científica, rechazó específicamente el atomismo, precisamente por el hecho de que estas teorías iban asociadas a la idea de vacío. Gassendi, nacido en Champtercier, Provenza, el 22 de enero de 1592, se doctoró en Teología en Avignon en 1616, se ordenó sacerdote

el año siguiente, y estaba dedicado a la docencia en la Universidad de Aix cuando, en 1624, publicó un libro en el que criticaba la visión aristotélica del universo. En 1633 fue nombrado preboste de la catedral de Digne y en 1645 ocupó la cátedra de matemáticas del Collége Royale de París. Pero su mala salud le obligó a dejar la enseñanza en 1648 y, desde entonces hasta 1650, vivió en Toulon, antes de regresar a París, donde falleció el 24 de octubre de 1655.

Aunque llevó a cabo muchas observaciones astronómicas y la famosa prueba de la inercia utilizando una galera, la contribución más importante de Gassendi a la ciencia fue la recuperación del atomismo, que presentó con una claridad máxima en un libro publicado en 1649. Gassendi pensaba que las propiedades de los átomos (por ejemplo, su sabor) dependían de su forma (puntiaguda o redonda, alargada o achaparrada, etc.), y tenía la idea de que podrían unirse unos con otros mediante una especie de mecanismo de corchete para formar lo que él llamó moléculas. También defendió firmemente la idea de que los átomos se desplazaban por el vacío y que no había literalmente cosa alguna en los espacios existentes entre los átomos. Sin embargo, confirmando el antiguo refrán que dice que nada es perfecto, Gassendi se opuso, entre otras cosas, a las teorías de Harvey sobre la circulación de la sangre.

La razón por la que Gassendi y un buen número de sus contemporáneos estaban dispuestos a aceptar la idea del vacío en la década de 1640 era la existencia de pruebas experimentales que demostraban que «el vacío» era algo real. Evangelista Torricelli (1608-1647) fue un científico italiano que llegó a conocer a Galileo cuando a éste le quedaban sólo unos meses de vida, y que fue profesor de matemáticas en Florencia desde 1642. Galileo dio a conocer a Torricelli el problema de que el agua de un pozo no podía ser bombeada por una tubería vertical a una altura de más de 9 metros. Según el razonamiento de Torricelli,

era el peso de la atmósfera al presionar hacia abajo sobre la superficie del agua del pozo (o de cualquier otro lugar) lo que producía una presión capaz de aguantar el peso del agua que subía por la tubería, y que esto sólo podía suceder si la presión producida por el peso del agua de la tubería era menor que la presión ejercida por la atmósfera. Comprobó esta teoría en 1643 utilizando un tubo de mercurio sellado en su extremo superior, colocado verticalmente sobre una cubeta poco profunda donde se encontraba el metal líquido, de tal forma que el extremo abierto del tubo quedara bajo la superficie del líquido. Dado que el mercurio es aproximadamente catorce veces más pesado que un volumen igual de agua, Torricelli predijo que la columna de mercurio se detendría dentro del tubo a una altura de unos 60 centímetros, y así sucedió —quedando un espacio entre el extremo superior de la columna de mercurio y el extremo sellado del tubo por encima del mercurio—. Cuando Torricelli percibió que de un día para otro se producían ligeras variaciones en la altura del mercurio, concluyó que eran producidas por cambios de la presión atmosférica —había inventado el barómetro, y también había creado un vacío.

Descartes rechaza el concepto de vacío

Descartes tenía pleno conocimiento de estos trabajos —como ya hemos mencionado, él mismo sugirió la idea de llevar un barómetro a una montaña para observar cómo variaba la presión con la altitud—. Sin embargo, no aceptaba la idea de que el espacio que quedaba sobre el mercurio (o el agua) fuera un vacío. Tenía la idea de que las sustancias habituales, como el aire, el agua o el mercurio estaban mezcladas con una sustancia mucho más fina, un fluido que llenaba todos los espacios en que no estuvieran las demás sustancias, y que evitaba la existencia de un vacío. El mercurio de un barómetro, por ejemplo, se po-

día comparar con una columna de algo parecido a algún tipo flexible de lana de acero, de la que se usa para fregar sartenes, mezclada con algún líquido invisible, como un aceite de oliva muy refinado, que llenaría los espacios que de otro modo quedarían vacíos entre los filamentos de alambre, y también el espacio que quedaba encima de la columna.[4]

Aunque los experimentos realizados por encargo de Pascal (que estaba demasiado enfermo para hacerlos por sí mismo y encomendaba la tarea a su cuñado) parecen indicar que la atmósfera se vuelve menos densa a medida que subimos a mayor altura, y que debe existir un límite a partir del cual ya no hay atmósfera, sino vacío, Descartes decía que su fluido universal se extendía más allá de la atmósfera y a través del universo, de tal forma que no había vacío en ninguna parte. Desarrolló un modelo, que desde el punto de vista actual resulta muy curioso, en el que los planetas son arrastrados por vórtices turbulentos que se producen en dicho fluido, como unas virutas de madera arrastradas por los remolinos de una corriente. Partiendo de esta hipótesis, podía argumentar que la Tierra en realidad no se movía, porque estaba quieta con respecto al fluido en que estaba sumergida —sencillamente, el lazo de fluido que la rodeaba estaba en un remolino que se movía alrededor del Sol—. Parece como si se tratara casi de un esquema retorcido diseñado expresamente con el propósito de conseguir una vía de escape para poder asumir las teorías copernicanas, consiguiendo al mismo tiempo tener contentos a los jesuitas —pero todos los indicios apuntan a que Descartes se inclinó por este modelo, no por temor a la Inquisición, sino porque le horrorizaba la idea del vacío—. Todo este asunto difícilmente merecería una sola línea en la historia de la ciencia, si no fuera por una cosa. La influencia de Descartes fue tan grande durante las décadas posteriores a su muerte que en Francia, y en otros lugares de Europa, se retrasó considerablemente la aceptación de las teorías de Newton

sobre la gravedad y los movimientos planetarios porque no concordaban con las teorías de Descartes. En esto había también un aspecto chauvinista —los franceses apoyaban a su propio campeón y rechazaban las teorías de un pérfido inglés, mientras que Newton, por supuesto, era una especie de profeta al que rendían honores en su propia tierra.

Aunque el concepto que Descartes tenía del universo carecía de vacío, por decirlo así, le llevó a un callejón sin salida al intentar explicar el movimiento de los planetas, sin embargo, le resultó más fructífero en sus trabajos sobre la luz, a pesar de que finalmente resultara incorrecto. Según los atomistas, como Gassendi, la luz tenía como causa unas corrientes de partículas diminutas que surgían de objetos brillantes, como el Sol, y que chocaban contra los ojos del observador. Según Descartes, la visión era un fenómeno causado por la presión que actúa sobre el fluido universal, de tal forma que el Sol, por ejemplo, empujaba el fluido, y este empuje (como cuando se hurga en algo con un bastón) se traducía inmediatamente en una presión sobre los ojos de cualquiera que mirara al Sol.[5] Aunque la versión original de esta teoría preveía la actuación de una presión constante sobre los ojos, sólo había un corto paso entre esto y la teoría de que podrían producirse pulsaciones de presión que se difundieran desde un objeto brillante —no exactamente como las ondulaciones que se propagan sobre la superficie de una charca, sino más bien como las ondas de presión que reverberarían a través de la masa de agua de la charca si se golpea con fuerza su superficie. Quien más hizo para desarrollar plenamente esta teoría fue Christiaan Huygens, en la segunda mitad del siglo XVII. Christiaan Huygens era el hijo del viejo amigo de Descartes, Constantijn, y habría sido el científico más importante de su generación si no hubiera tenido la mala suerte de desarrollar sus actividades científicas casi al mismo tiempo que Isaac Newton.

El padre de Christiaan Huygens no fue el primer miembro de la familia que sirvió a la Casa de Orange, por lo que se esperaba de Christiaan —nacido el 14 de abril de 1629 en La Haya— que siguiera la tradición familiar. Como miembro de una familia rica y prominente, hasta los 16 años de edad Christiaan fue educado en su propia casa al nivel más alto de la época y esto le brindó amplias oportunidades de conocer a las figuras más importantes, que visitaban frecuentemente la casa, y entre las que cabe señalar a René Descartes. Es muy posible que este contacto con Descartes contribuyera a suscitar en Huygens el interés por la ciencia, aunque en 1645 el muchacho parecía estar encaminado hacia la carrera diplomática. Sin embargo, aquel año fue enviado a la Universidad de Leiden a estudiar matemáticas y leyes. Pasó dos años más estudiando leyes en Breda, desde 1647 a 1649, pero a los 20 años de edad renunció a la tradición familiar y decidió dedicarse al estudio de la ciencia. Lejos de poner objeciones a esta decisión, su padre (que no era sólo un diplomático, sino también un poeta de gran talento que escribía en holandés y en latín, además de componer música) tenía una mentalidad suficientemente abierta y le concedió a Christiaan una asignación gracias a la cual éste dispuso de libertad para estudiar lo que quisiera. Durante los diecisiete años siguientes, Christiaan Huygens residió en La Haya y se dedicó al estudio científico de la naturaleza. Llevaba una vida bastante tranquila que le daba amplias oportunidades para centrarse en su trabajo, pero no daba mucho de sí en cuanto a anécdotas que pudieran contarse sobre él, y tuvo que transcurrir bastante tiempo para que la reputación de Huygens como científico comenzara a difundirse, ya que siempre fue extremadamente reacio a publicar cualquier cosa hasta haber trabajado minuciosa-

mente todos los detalles. No obstante, lo que sí hizo fue viajar bastante: visitó Londres en 1661 y pasó cinco meses en París en 1655, donde conoció a muchos científicos punteros, entre los que cabe citar a Pierre Gassendi.

Los primeros trabajos de Huygens se desarrollaron principalmente en el campo de las matemáticas, donde mejoró las técnicas existentes y desarrolló sus propios métodos, sin llegar a ningún avance realmente importante. Esta actividad le llevó a la mecánica, donde hizo un trabajo importante sobre el momento de una fuerza, estudió la naturaleza de la fuerza centrífuga, demostrando su similitud con la gravedad, y mejoró los métodos de Galileo para calcular las trayectorias de los proyectiles. Estos trabajos marcaban con tanta claridad el camino que se debía seguir para avanzar, que, si un genio excepcional como Isaac Newton no hubiera existido en aquella época, no cabe duda de que la famosa ley de la gravedad, llamada del cuadrado inverso, habría sido descubierta por algún otro en la siguiente generación de científicos.[6] No obstante, Huygens llegó a ser muy conocido (incluso fuera de los círculos científicos) por su invento del reloj de péndulo (según parece, con total independencia de lo que hizo Galileo), que patentó en 1657. La motivación para realizar este trabajo nació de su interés por la astronomía, donde la necesidad de medir los tiempos con exactitud había sido obvia desde muy antiguo, pero era cada vez más apremiante a medida que aparecían diseños de aparatos de observación más precisos. A diferencia del modelo de Galileo, el aparato de medición del tiempo de Huygens demostró ser robusto y práctico (aunque no lo suficientemente robusto como para medir tiempos con precisión en el mar, lo que seguía siendo uno de los principales problemas no resueltos de aquella época), y en 1658 empezaron a aparecer relojes construidos según el diseño de Huygens por toda Holanda en los campanarios de las iglesias, y pronto se difundieron por el resto de Europa.

Fue a partir de 1658, y gracias a Christiaan Huygens, cuando la gente corriente empezó a tener acceso a la hora exacta, en vez de tener que conformarse con calcular aproximadamente la hora del día según la posición del Sol. Una consecuencia típica de la meticulosidad con que Huygens llevaba a cabo todo su trabajo es que la investigación sobre los péndulos le llevara no sólo al diseño práctico de un reloj, sino a una teoría plenamente desarrollada sobre el comportamiento de los sistemas oscilatorios en general, y no únicamente de los péndulos, y la razón de todo esto era que necesitaba un cronómetro preciso para sus trabajos astronómicos.

Actualmente, poca gente conoce los trabajos de Huygens sobre relojes. Sin embargo, son bastantes más los que saben que Huygens tuvo algo que ver con la teoría ondulatoria de la luz. Esta teoría, como la teoría de los sistemas oscilatorios, surgió a partir de un trabajo práctico relacionado con la astronomía. En 1655, Christiaan Huygens comenzó a trabajar con su hermano Constantijn (que se llamaba igual que su padre) en el diseño y la construcción de una serie de telescopios que fueron los mejores instrumentos astronómicos de la época. Todos los telescopios refractores que se habían construido hasta entonces tenían un problema llamado aberración cromática, que se produce porque las lentes del telescopio desvían las luces de diferentes colores con desviaciones ligeramente diferentes, produciendo franjas de color alrededor de los bordes de las imágenes de los objetos que se observan a través del telescopio. Esto no tenía demasiada importancia si se utilizaba el telescopio para identificar un barco en el mar, pero era un gran estorbo para el trabajo de precisión que había que realizar en astronomía. Los hermanos Huygens hallaron el modo de reducir considerablemente la aberración cromática, utilizando una combinación de dos lentes delgadas en el ocular del telescopio, en vez de una lente gruesa. No era una solución perfecta, pero era mucho me-

jor que cualquier cosa de las que se habían hecho hasta entonces. Los hermanos Huygens eran también muy hábiles tallando lentes. Producían unas lentes grandes y con formas precisas que por sí solas hubieran hecho que sus telescopios fueran mejores que todos los que se hacían en aquella época. Con el primer telescopio que construyeron utilizando el nuevo diseño, en 1655 Christiaan Huygens descubrió Titán, la mayor de las lunas de Saturno. Este descubrimiento fue casi tan sensacional como el hallazgo de las lunas de Júpiter por parte de Galileo. Hacia finales de esta década, utilizando otro telescopio construido también con su hermano, pero mayor que el anterior, Huygens resolvió el misterio del aspecto peculiar de Saturno, al descubrir que este planeta estaba rodeado por un delgado anillo plano de materia, del que a veces se ve desde la Tierra sólo su borde (por lo cual da la sensación de que desaparece) y otras veces se ve su parte plana (de tal manera que, con un telescopio pequeño como el de Galileo, parece como si a Saturno le hubieran crecido un par de orejas). Todos estos descubrimientos sirvieron para consolidar la fama de Huygens. A principios de la década de 1660, pasó mucho tiempo en París, aunque seguía teniendo su residencia en La Haya, y en 1666, cuando se fundó en Francia la Real Academia de las Ciencias, fue invitado a trabajar de manera permanente en París bajo los auspicios de la Academia, como uno de sus siete miembros fundadores.

La fundación de las primeras «Royal Societies» o Reales Academias de la Ciencia, que se produjo por aquellos años, constituyó un hito importante en la historia de la ciencia, marcando la mitad del siglo XVII como la época en que la investigación científica comenzó a formar parte del entramado institucional. La primera de estas sociedades científicas que recibió una confirmación oficial fue la Accademia del Cimento (Academia de Ciencias Experimentales), fundada en Florencia en 1657 por dos científicos que habían sido discípulos de Galileo, Evan-

gelista Torricelli y Vincenzo Viviani, bajo el patrocinio del Gran Duque Fernando II y su hermano Leopoldo. Esta asociación fue la sucesora espiritual de la fracasada Sociedad de los Linces, que nunca se recuperó de la muerte de Frederico Cesi. Sin embargo, la Accademia del Cimento sólo duró diez años, y su desaparición en 1667, entre otras cosas, marca la fecha en que llegó a su fin el liderazgo italiano en las ciencias físicas que había sido inspirado por el Renacimiento.

Para entonces ya había comenzado a reunirse en Londres una sociedad científica que iba a ser, entre todas las del mundo, la que duraría más tiempo funcionando con continuidad. A partir de 1645, un grupo de personas con mentalidad científica comenzaron a reunirse con regularidad en Londres para discutir teorías nuevas y comunicarse entre sí las noticias de nuevos descubrimientos, así como para transmitirlas por carta a otros pensadores de toda Europa que tuvieran la misma mentalidad científica. En 1662, con unos estatutos otorgados por Carlos II, este grupo se convirtió en la Royal Society (como primera sociedad de este tipo, no necesita otra descripción; se trata de la Royal Society, a la que a veces nos referimos denominándola sencillamente «la Royal»), Sin embargo, aunque se llamara «real», esta sociedad establecida en Londres estaba formada por un conjunto de personas particulares, carecía de fuentes de financiación oficiales y no tenía ningún tipo de obligación o compromiso con el gobierno. En el transcurso de una breve visita a Londres en 1663, Huygens se convirtió en uno de los primeros extranjeros que fueron miembros de la Royal Society. El equivalente francés, la Académie des Sciences, fundada cuatro años después de que la Royal Society recibiera sus estatutos, disfrutó de los privilegios de ser una institución gubernamental, establecida bajo el patrocinio de Luis XIV (el nieto de Enrique IV), lo cual le permitió proporcionar ayuda financiera y medios prácticos a científicos eminentes, como Huygens, pero

también le hizo tener que cumplir ciertas obligaciones (a veces onerosas). El éxito que tuvieron ambas sociedades, cada una a su manera, sirvió de acicate para que surgieran muchas imitaciones (generalmente configuradas según uno de estos modelos), comenzando por la Akademie der Wissenschaften de Berlín, creada en 1700.

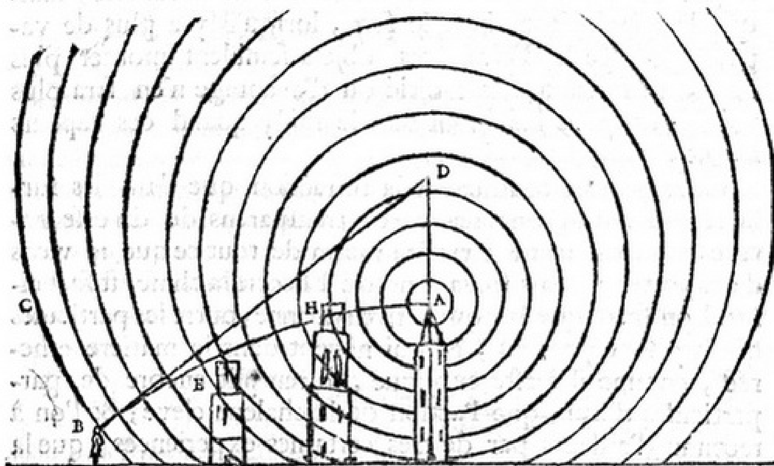
Huygens había padecido siempre de mala salud y, aunque residió en París durante los quince años siguientes, tuvo que regresar dos veces a Holanda, permaneciendo allí durante períodos bastante largos para recuperarse de sus enfermedades. Esto no le impidió llevar a cabo algunos de sus trabajos más importantes durante el tiempo que pasó en París, y fue allí donde (dejando de lado algunos detalles) terminó sus trabajos de óptica en 1678 (sin embargo, como era ya típico en Huygens, los resultados no se publicaron en su totalidad hasta 1690). Aunque partió hasta cierto punto de la obra de Descartes, a diferencia de las ideas de éste, la teoría de la luz de Huygens estaba firmemente basada en sus experiencias prácticas de trabajar con lentes y espejos, intentando resolver los problemas (tales como la aberración cromática) con que se había encontrado al construir telescopios. Su teoría podía explicar cómo un espejo refleja la luz y como ésta sufre una refracción cuando pasa del aire al cristal o al agua, todo ello en términos de ondas de presión que se producen en un fluido, al que se llamó éter. Esta teoría realizaba una predicción especialmente importante: que la luz tendría que viajar a menos velocidad en un medio más denso (como el cristal), y a una velocidad mayor en uno menos denso (como el aire). Esta predicción tuvo consecuencias importantes a largo plazo, ya que en el siglo XIX facilitaría la prueba definitiva para averiguar si la luz se desplaza como una onda o como una corriente de partículas. A corto plazo, tuvo también una gran importancia, ya que Descartes, y todos los que le precedieron, habían asumido que la luz tenía que desplazarse a una ve-

locidad infinita, por lo que, según el modelo de Descartes, una perturbación que se produjera, por ejemplo, en el Sol afectaría a los ojos inmediatamente. Huygens llegó justo al punto decisivo de la investigación cuando, a finales de la década de 1670, utilizó para su modelo una velocidad finita de la luz. Pudo hacerlo porque se encontraba precisamente en el lugar adecuado, en París, cuando se hizo este descubrimiento crucial.

El salto conceptual tan enorme que era necesario para la constatación de que la velocidad de la luz, aunque era muy grande, no era infinita, se originó en los trabajos de Ole Römer, un danés que trabajó en ello porque coincidió con Huygens en la Academia Francesa. Römer había nacido en Arhus el 25 de septiembre de 1644 y, después de estudiar en la Universidad de Copenhague, se quedó a trabajar en esta misma universidad como ayudante del físico y astrónomo Erasmus Bartholin. En 1671, Jean Picard (1620-1682) fue enviado a Dinamarca por la Academia Francesa para determinar la posición exacta del observatorio de Tycho Brahe (cuestión importante para hacer un análisis astronómico preciso de sus observaciones), y Römer le ayudó en esta tarea, causando una impresión tan positiva, que fue invitado a volver a París, donde trabajó en la Academia y fue tutor del Delfín de Francia. El mejor trabajo de Römer surgió como resultado de las observaciones que hizo para estudiar las lunas de Júpiter, llevadas a cabo conjuntamente con Giovanni Cassini (que vivió entre 1625 y 1712, y es recordado sobre todo por un espacio hueco entre los anillos de Saturno, que se conoce todavía como división de Cassini). Dado que todas las lunas giran en torno a sus respectivos planetas describiendo órbitas regulares —al igual que la Tierra sigue una órbita regular de un año de duración alrededor del Sol—, cada luna debería quedar eclipsada detrás de Júpiter a intervalos regulares. Sin embargo, Römer observó que el intervalo de tiempo transcurrido entre estos eclipses no era siempre el mismo, y variaba de

un modo que tenía relación con la posición en que se situaba la Tierra con respecto a Júpiter al moverse en su órbita alrededor del Sol. Su interpretación fue que estas variaciones eran una consecuencia de la velocidad finita de la luz —cuando la Tierra está más alejada de Júpiter, vemos más tarde los eclipses, porque la luz que nos trae la información sobre ellos tiene un recorrido más largo desde Júpiter hasta nuestros telescopios—. Basándose en una pauta que había descubierto en el modo en que los tiempos de los eclipses variaban, Römer calculó que un eclipse de la luna más interior de Júpiter, llamada Io, que debía producirse el 9 de noviembre de 1679, ocurriría diez minutos más tarde de lo previsto, y esto resultó ser cierto, cosa que causó sensación en aquel momento. Utilizando la mejor estimación disponible entonces para el diámetro de la órbita de la Tierra,[7] Römer calculó a partir de aquel retraso temporal que la velocidad de la luz debía ser (en unidades modernas) 225 000 kilómetros por segundo. Usando el mismo cálculo, pero poniendo como dato la estimación actual más precisa del tamaño de la órbita de la Tierra, las propias observaciones de Römer dan como resultado que la velocidad de la luz es 298 000 kilómetros por segundo. Es asombroso cómo se acerca este valor al que se conoce hoy en día para la velocidad de la luz, 299 792 kilómetros por segundo, sobre todo teniendo en cuenta que fue la primera medición que se realizó. Después de haberse asegurado así un lugar en la historia (aunque en aquella época no todo el mundo se convenció tan rápidamente como Huygens), Römer viajó a Inglaterra, donde conoció a Isaac Newton, Edmond Halley y John Flamsteed, entre otros. Regresó a Dinamarca en 1681, y llegó a ser astrónomo real y director del Observatorio Real de Copenhague, donde murió el 23 de septiembre de 1710.

vent s'étendre plus amplement vers en haut, & moins vers en bas, mais vers les autres endroits plus ou moins ſelon qu'ils



approchent de ces deux extremes. Ce qui eſtant, il s'enſuit neceſſairement que toute ligne, qui coupe une de ces ondes à angles droits, paſſe au deſſus du point A, ſi ce n'eſt la ſeule qui eſt perpendiculaire à l'horizon.

Soit B C l'onde qui porte la lumiere au ſpectateur qui eſt en B, & que B D ſoit la droite qui coupe cette onde perpendiculairement. Or parce que le rayon ou la ligne droite, par laquelle nous jugeons l'endroit où l'objet nous paroit, n'eſt autre choſe que la perpendiculaire à l'onde qui arrive à noſtre oeil, comme l'on peut entendre par ce qui à eſté dit cy deſſus, il eſt manifeſte que le point A s'appercevra comme eſtant dans la droite B D, & ainſi plus haut qu'il n'eſt en effet.

De meſme ſi la Terre eſt A B, & l'extremité de l'Atmoſphere

CD;

10. Dibujo de ondas luminosas, incluido en el *Traité de la Lumière*, de Christiaan Huygens, 1690.

El trabajo de Huygens sobre la luz, realizado conjuntamente con Römer en París, fue el logro que coronó su carrera, y se publicó en 1690 con el título *Traite de la Lumière* (*Tratado de la luz)*. Huygens terminó su libro después de regresar a Holanda en 1691, debido en parte al deterioro que había experimentado su salud, pero también porque una vez más el clima político había cambiado en Francia. Intentaremos explicarlo con paciencia, porque estas cuestiones políticas son más que complicadas. Aunque España había reconocido en 1648 la independencia de los holandeses en la parte norte de los Países Bajos (la región cuyo nombre, Holanda, se suele utilizar actualmente para denominar la totalidad del país), los españoles seguían gobernando en la parte sur.

En 1660, Luis XIV se había casado con María Teresa, la hija mayor de Felipe IV de España, y, cuando Felipe IV murió en 1665, dejando como sucesor a su hijo menor de edad Carlos II, Luis aprovechó la oportunidad para reclamar las posesiones que España tenía todavía en los Países Bajos (incluida buena parte de lo que actualmente es Bélgica) y también para poner sus ojos codiciosos en Holanda. A estas ambiciones se opuso inicialmente una alianza formada por Holanda, Inglaterra y Suecia. Sin embargo, Luis XIV persuadió a Inglaterra para que cambiara de bando, ofreciéndole unos generosos incentivos financieros y la promesa de territorios en el continente europeo una vez que los Países Bajos hubieran sido conquistados.

Esta alianza tan poco natural, de la que se resintió profundamente el pueblo inglés, se formó, en parte, porque Carlos II de Inglaterra estaba casado con una prima de Luis XIV —Carlos I se había casado con Enriqueta María, la hermana de Luis XIII —. También sucedía que Carlos II estaba ansioso por tener un aliado poderoso, ya que había vuelto a ocupar el trono en un proceso de restauración de la monarquía que siguió a la guerra civil y a un interregno parlamentario. Por añadidura, para

complicar aún más las cosas, existía una cláusula secreta en el tratado establecido entre él y Luis XIV, en virtud de la cual Carlos II se comprometía a convertirse al catolicismo. De hecho, no llegó a convertirse hasta sus últimos momentos en su lecho de muerte. Como era de esperar, esta alianza no duró mucho tiempo y, tras las derrotas de la Armada inglesa frente a los holandeses, Francia tuvo pleno poder de decisión después de 1672 para invadir los Países Bajos. Bajo el gobierno de Guillermo de Orange (nieto de Carlos I de Inglaterra y sobrino de Carlos II, ya que su madre era hermana mayor de éste) y con ayuda de otros países (incluida España, que estaba encantada con tener la oportunidad de formar una alianza que se opusiera a Francia, aunque eso significara ayudar a los holandeses), las tropas holandesas no sólo resistieron a los invasores, sino que consiguieron realmente una paz honorable gracias al tratado que se firmó en Nimega en 1678. Fue después de esta derrota de la ambición francesa, en parte a manos de los protestantes en Holanda, cuando la situación de los protestantes holandeses de París llegó a hacerse insoportable (por supuesto, habrían sido tolerados mejor si los franceses hubieran ganado), por lo cual Huygens regresó a su país de origen.[8] a pesar de que continuaba padeciendo una mala salud, Huygens hizo varios viajes más al extranjero, incluida otra visita a Londres en 1689, en el transcurso de la cual conoció a Newton. Su última enfermedad, sobrevenida en 1694, fue fulminante, aunque sufrió durante meses hasta que finalmente sucumbió el 8 de julio de 1695, falleciendo en La Haya.

ROBERT BOYLE: ESTUDIO DE LA PRESIÓN DE LOS GASES

A pesar de la guerra entre Francia y los Países Bajos, la vida de Huygens transcurrió en su mayor parte sin incidentes, fuera de lo que era su actividad científica. Pero difícilmente se puede

decir lo mismo de su contemporáneo Robert Boyle, que casi sin ayuda consiguió que la química fuera una actividad respetable, estudió el comportamiento de los gases, impulsó la idea de la existencia de los átomos y, fuera de la ciencia, tuvo una vida que parecía sacada de las páginas de una novela. Si se puede decir que Huygens había nacido en buena cuna, habría que decir que Boyle nació en una mucho mejor. La mayoría de los escritos que hablan de la vida de Robert Boyle mencionan que fue el decimocuarto hijo del conde de Cork (y el séptimo de los hijos varones, aunque uno de ellos murió al nacer), y este conde era el hombre más rico de las islas Británicas en aquel momento. Sin embargo, pocos de estos relatos aclaran que el conde no era un aristócrata de nacimiento, sino un hombre que se había hecho a sí mismo y que se dejaba llevar por un ardiente deseo de hacer fortuna y alcanzar una posición respetable dentro de la sociedad. Fue el típico aventurero de los tiempos de Isabel I, y consiguió todo lo que se proponía mediante una combinación de suerte y habilidad. Llegó al mundo el 13 de octubre de 1566, llamándose sencillamente Richard Boyle, y siendo la suya una familia de gentilhombres, pero no prominente. Asistió a la King's School de Canterbury a principios de la década de 1580, al mismo tiempo que Christopher Marlowe, que era dos años mayor que él, y luego estudió en Cambridge. Comenzó los estudios de leyes en el Middle Temple, pero se quedó sin medios económicos y tuvo que trabajar como empleado de un abogado en Londres, antes de marcharse a hacer fortuna en Irlanda (que entonces era una colonia de Inglaterra) en 1588, el año de la Armada española y, asimismo, el año en que cumplió los 22. Debido a que su padre había fallecido largo tiempo atrás y su madre había muerto en 1586, tuvo que abrirse camino en la vida por sí mismo.

Según el propio relato de Richard Boyle, llegó a Dublín con 27 libras y 3 chelines en metálico, a lo que se añadía un anillo

de diamantes y un brazalete de oro que le había dado su madre, y llevando en su bolsa una capa y un traje nuevos, junto con algo de ropa interior, además de lo que llevaba puesto: un jubón de tafetán, calzas de terciopelo negro, una capa, una daga y un estoque. Probablemente llevara también un sombrero, aunque no lo menciona. Dado que era un joven inteligente, educado y con una implacable ambición de ascender, Boyle encontró trabajo en el departamento gubernamental que se encargaba de revertir las tierras y las propiedades que habían sido confiscadas por la Corona durante la reconquista de Irlanda, que había finalizado precisamente por aquella época. Enormes zonas del país habían sido tomadas y luego regaladas (o vendidas) a ingleses de alto nivel social, mientras que en otros casos los terratenientes irlandeses tenían que mostrar pruebas de que sus propiedades les pertenecían. Era cosa habitual ofrecer sobornos y regalos a funcionarios como Boyle, al mismo tiempo que aquel tipo de trabajo le daba acceso a información confidencial sobre terrenos que se podía adquirir a precios de saldo. Sin embargo, aunque fueran saldos, había que pagarlos. Después de siete años sin conseguir hacer fortuna, en 1595, Richard se casó con una viuda adinerada, cuyas tierras propias producían una renta de 500 libras anuales, y Boyle empezó a utilizar este dinero para hacer unas inversiones que acabaron prosperando más allá de lo que él hubiera podido imaginar en sus sueños más ambiciosos, pero su esposa falleció en 1599, al dar a luz un hijo que nació muerto. Finalmente conseguiría asegurar su posición, pero, antes, Richard Boyle sufrió un revés al perder buena parte de sus propiedades en la rebelión de Munster de 1598 y tuvo que huir a Inglaterra; además, por aquella época, fue arrestado tras formularse contra él acusaciones de malversación, pero quedó absuelto en un juicio que presidieron la reina Isabel I y su Consejo privado (probablemente era culpable, aunque seguramente fue lo bastante astuto como para saber borrar las hue-

llas que hubiera dejado). La defensa que hizo Boyle de su propio caso, además de tener éxito, consiguió impresionar a la reina y, cuando se estableció una nueva administración en Irlanda, Richard fue nombrado secretario del Consejo, un puesto clave en la gestión de los asuntos cotidianos del país. La compra más importante, la que cambiaría definitivamente su vida, llegó en 1602, cuando compró a precio de saldo unas propiedades ruinosas en Waterford, Tipperary y Cork. Se trataba de unas propiedades que habían pertenecido a sir Walter Raleigh y que éste había descuidado hasta tal punto que con ellas se perdía dinero. Mediante una buena gestión, Boyle logró que la situación cambiara hasta tal punto que estas propiedades empezaron a rendir unos beneficios muy considerables. Al mismo tiempo, construyó escuelas y asilos para pobres, carreteras nuevas y puentes, e incluso fundó pueblos completamente nuevos, demostrando así que era uno de los más ilustrados entre los terratenientes ingleses que había en Irlanda en aquella época.

En 1603, Richard Boyle había escalado hasta un nivel tan alto que se casó con Catherine Fenton, que tenía 17 años y era hija del secretario de Estado para Irlanda. El mismo día de su boda fue nombrado caballero. Catherine tuvo nada menos que quince hijos, a los que casó convenientemente, en cuanto llegaron a tener edad para ello, con el fin de proporcionar a la familia las relaciones más ventajosas que sir Richard y su dinero podían conseguir (el propio sir Richard se convirtió en el primer conde de Cork en 1620, en gran parte gracias a las 4000 libras que «donó» a las instancias pertinentes). La más importante de estas relaciones fue la que se estableció cuando Francis Boyle, a los 15 años de edad, se casó con Elizabeth, hija de sir Thomas Stafford, un caballero que era ujier en la Corte de la reina Henrietta María (la hermana de Luis XIII). El rey Carlos I fue el padrino de la novia, la reina ayudó a la novia a prepararse para la noche de bodas, y tanto el rey como la reina permanecieron en

el dormitorio hasta ver a la joven pareja acostada en el lecho nupcial.

Aunque todos los casamientos lograron el objetivo previsto de establecer vínculos entre el nuevo rico (aunque ser nuevo rico no era ningún estigma en aquella época) y miembros de la alta sociedad, no tuvieron, sin embargo, tanto éxito en los aspectos personales de las vidas de los cónyuges. Los únicos hijos de Boyle que escaparon a este destino fueron Robert, el menor de los hijos varones del conde (nacido el 25 de enero de 1627, cuando su madre tenía 40 años y su padre 61), y Margaret, la hermana menor de Robert —y la única razón por la que se libraron de estos matrimonios concertados fue que el conde falleció antes de que ambos tuvieran la edad mínima para que se decidieran sus esponsales (en el caso de Robert, el conde había elegido ya una novia para su hijo, pero murió antes de que la boda pudiera organizarse). Ninguno de ellos se casó, lo que posiblemente se debió en parte al hecho de haber visto de cerca los desastres matrimoniales de sus hermanos y hermanas.

La vida nunca fue fácil físicamente para los hijos varones de Richard Boyle, a pesar de que tuvieron garantizada una seguridad económica total. El padre tenía claro que, a pesar de su riqueza, los hijos varones en particular no debían ser educados de una forma blanda, y para conseguirlo envió a cada uno de sus hijos, en cuanto tuvieron edad suficiente para separarlos de su madre, a vivir fuera del hogar, con alguna familia campesina cuidadosamente seleccionada, para que se endureciesen. En el caso de Robert, esto significó que, tras marcharse de su casa siendo todavía un niño pequeño, nunca volvió a ver a su madre, ya que ésta murió cuando tenía alrededor de 45 años y el niño sólo 4, un año antes de que Robert volviera a la casa familiar. Desde los 5 hasta los 8 años, Robert vivió con su padre y con los hermanos que aún no habían salido de la casa paterna para casarse (un número que disminuía continuamente), y aprendió

las nociones básicas de lectura, escritura, latín y francés. Cuando se consideró que estaba preparado para la fase siguiente del proceso de endure cimiento, fue enviado a Inglaterra (junto con su hermano Francis, que era un poco mayor que él) para que estudiara en Eton, donde el preboste era sir Henry Wotton que había sido embajador en Venecia y era un viejo amigo del conde. Robert se integró en la vida académica con tan buena disposición que era necesario obligarle a que dejara de estudiar de vez en cuando para que participara en los juegos, que eran, y en aquel tiempo, una parte muy importante de la vida de los estudiantes en Eton aunque Robert Boyle los aborreciera. Sus estudios se vieron interrumpidos también una y otra vez por una enfermedad recurrente que le iba a atormentar durante toda su vida.

Cuando Robert Boyle tenía 12 años de edad, su padre compró la mansión de Stallbridge, en Dorset, para utilizarla como residencia en Inglaterra, y se llevó a Francis y a Robert a vivir con él allí —Francis vivió realmente en la mansión, pero Robert aunque era sabido que gozaba de ventajas como hijo favorito de sir Richard (o quien por esto mismo) fue enviado a alojarse con el pastor en la rectoría, para fomentar en él el estudio, en vez de dejarle que pasara el tiempo holgazaneando—. Parecía destinado a ir a la universidad, pero, cuando casaron a Francis con Elizabeth Stafford (quien más tarde sería conocida como «Black Betty» por su belleza, conquistaría la fama o más bien notoriedad, en la Corte, donde llegó a ser amante de Carlos II, y tendría una hija con él), la vida de Robert cambió drásticamente. Dado que Richard Boyle consentía que sus hijos varones disfrutaran de cosa alguna que se pudiera considerar un placer ocioso, cuatro días después de la boda el conde envió a Francis, un recién casado de 15 años de edad, a Francia, acompañado por un tutor y por su hermano Robert. Hemos sabido que «el recién casado [se encontraba] extremadamente afligido

por verse privado tan pronto de una alegría que había podido probar, pero sólo lo suficiente para aumentar su pesar por el hecho de haber conocido lo que le obligaban a abandonar».[9] Pero no había nada que discutir con un padre como el primer conde de Cork.

Después de viajar a través de Francia, pasando por Rouen, París y Lyon, el pequeño grupo se estableció en Ginebra, donde Robert encontró finalmente un deporte que le agradaba (el tenis), pero continuó estudiando con su entusiasmo de siempre, independientemente del ambiente en que se encontrara. En 1641, Francis, Robert y el tutor de ambos emprendieron un viaje a Italia, financiado por el conde (con el increíble presupuesto de 1000 libras anuales), y estuvieron realmente en Florencia cuando murió Galileo.[10] El alboroto que produjo este suceso en dicha ciudad despertó curiosidad del joven Boyle, que comenzó a leer muchas cosas sobre Galileo y su obra. Parece que éste fue un acontecimiento crucial que decidió al joven a desarrollar su interés por la ciencia.

Sin embargo, al regresar a casa comprobó que las cosas estaban cambiando drásticamente. Aunque el conde de Cork era un terrateniente casi modélico, la mayoría de sus compatriotas ingleses trataban a los irlandeses con tal dureza que era inevitable que se produjeran algunas rebeliones, y una de éstas estalló en 1641.[11] Ya fuera un terrateniente modélico o no, el conde no pudo librarse de la hostilidad que sentían los irlandeses contra todo lo inglés y, cuando comenzaron las luchas (prácticamente una guerra civil), todos los ingresos que obtenía el conde de sus enormes propiedades en Irlanda desaparecieron de golpe. Cuando los hermanos Boyle finalizaron su aventura italiana y llegaron a Marsella, recibieron las primeras noticias relativas a la rebelión en una carta en que se les comunicaba que no volverían a percibir la asignación de 1000 libras anuales y se les prometía tan sólo la suma de 250 libras (una cantidad que también

era considerablemente elevada) para pagar su regreso inmediato a casa. Sin embargo, ni siquiera llegaron a recibir estas 250 libras; parece ser que las robó el hombre al que el conde encargó su entrega. En estas circunstancias adversas, el mayor de los dos hijos, Francis, se vio obligado a hacer el viaje de regreso como mejor pudo, para ayudar a su padre y sus hermanos (para ayudarles en la batalla, claro está), mientras el hermano menor, Robert, se quedaba con su tutor en Ginebra. En 1643, cuando las luchas terminaron, el conde de Cork, uno de los hombres más ricos de Inglaterra, estaba arruinado y dos de sus hijos habían muerto en el campo de batalla (Francis se distinguió en la lucha y sobrevivió). El propio conde no tardó en seguirles a la tumba, cuando le faltaba menos de un mes para cumplir los 77 años. Al año siguiente, Robert regresó a Inglaterra, a los 17 años de edad, sin un penique pero obligado por su honor a reembolsar a su tutor los gastos en que éste había incurrido para mantenerle en Ginebra y para ayudarle en su viaje de regreso a casa. Por si esto no fuera suficiente, aunque las luchas habían terminado en Irlanda, en Inglaterra había estallado la guerra civil.

Las causas de la guerra civil inglesa son muchas y complejas, siendo todavía un tema de discusión para los historiadores. Sin embargo, uno de los factores más importantes que influyeron en el desencadenamiento de este conflicto en la época en que éste se produjo fue la rebelión que había tenido lugar en Irlanda y que le había costado tan cara a la familia Boyle. Carlos I (que había sucedido a su padre, Jacobo I, en 1625) y su Parlamento se habían llevado a matar durante mucho tiempo y, cuando fue necesario organizar un ejército para sofocar la rebelión irlandesa, no estuvieron de acuerdo en quién tendría que reclutar ese ejército y tampoco en quién debería controlarlo. Finalmente el Parlamento organizó una milicia que habría de estar bajo el mando de los virreyes de Irlanda que nombrara

el Parlamento, no el rey. Como ya se sabía que el rey no estaría de acuerdo con esto, se aprobó la *Militia Ordinance* de 1642, sin tener en cuenta el detalle de conseguir la firma del rey. El 22 de agosto de aquel año, el rey se alzó en armas en Nottingham y lanzó a sus partidarios contra el Parlamento. En las batallas que se produjeron a continuación, Oliver Cromwell destacó como líder de las fuerzas parlamentarias. La primera fase de esta guerra finalizó tras la derrota de las tropas reales en la batalla de Naseby en junio de 1645 y la toma de Oxford por las fuerzas parlamentarias en junio de 1646. El propio rey cayó en manos de los parlamentarios en enero de 1647.

La paz duró poco, porque Carlos I escapó en noviembre de la custodia a la que estaba sometido en la isla de Wight, reunió sus tropas y llegó a un acuerdo secreto con los escoceses, ofreciendo concesiones a los seguidores del presbiterianismo si recuperaba su trono, pero fue capturado de nuevo. Los escoceses intentaron cumplir su parte del acuerdo, pero, en agosto de 1648, sus tropas fueron derrotadas en Preston y, el 30 de enero del año siguiente, Carlos I fue ejecutado. Desde 1649 hasta 1660 Inglaterra no tuvo rey, siendo gobernada por el Parlamento hasta 1653 y por Cromwell como lord Protector desde entonces hasta su muerte, acaecida en 1658. Entonces, la situación empezó a desenmarañarse, como si una película con los acontecimientos de las dos décadas anteriores se pasara hacia atrás a gran velocidad. Tras haber pasado por todo tipo de conflictos para librarse de un sistema de monarquía hereditaria, Inglaterra creyó que Richard Cromwell, el hijo de Oliver Cromwell, podía ser el heredero de su padre y ocupar el cargo de lord Protector, pero Richard fue derrocado por el ejército, que se posicionó a favor del regreso de los demás miembros del Parlamento de 1653 y, dado que no había otro que pareciera aceptable como jefe del Estado, Carlos II, que había estado exiliado en Francia hasta entonces, fue repuesto en el trono en

1660. Aunque después de la guerra civil el equilibrio de poder en Inglaterra se había inclinado claramente a favor del Parlamento en detrimento de la Corona, visto todo ello desde una distancia de casi 350 años, da la impresión de que el resultado fue muy modesto después de tan enorme esfuerzo.

Cuando Robert Boyle regresó, Inglaterra estaba más o menos dividida, con un bando apoyado por los realistas (que tenían su cuartel general en Oxford) y otro bando apoyado por el Parlamento (en Londres y el sudeste del país). Sin embargo, para muchos la vida continuaba sin demasiados trastornos, salvo en las zonas donde tuvieron lugar las batallas campales. No obstante, el hijo menor del conde de Cork no formaba parte de esa mayoría. Los miembros de su familia estaban considerados como amigos del rey, y a Robert podría haberle resultado difícil seguir su instinto natural para agachar la cabeza y evitar implicarse en el conflicto si no hubiera sido porque uno de los casamientos arreglados por su padre resultó muy beneficioso. A una de las hermanas de Robert, Katherine (que era su hermana favorita, aunque tenía trece años más que él), la habían casado con un joven que heredó el título de vizconde Ranelagh y, aunque el matrimonio fue un desastre para los cónyuges y la pareja no hizo vida en común durante mucho tiempo, la hermana del vizconde (que se llevaba bien con Katherine) estaba casada con un importante miembro del bando parlamentario, y la propia Katherine simpatizaba con la causa de los parlamentaristas y los recibía a menudo en su casa de Londres. Aquella casa fue el primer refugio de Robert cuando regresó a Inglaterra (allí conoció, entre otros, a John Milton), y en gran medida gracias a los contactos de Katherine pudo conservar la mansión de Stallbridge, que le había dejado en herencia su padre, después de la derrota de las fuerzas realistas durante la guerra civil.

En 1645, Boyle se retiró a su casa de campo, mantuvo la cabeza baja en todo lo relativo a la política y, con una renta que

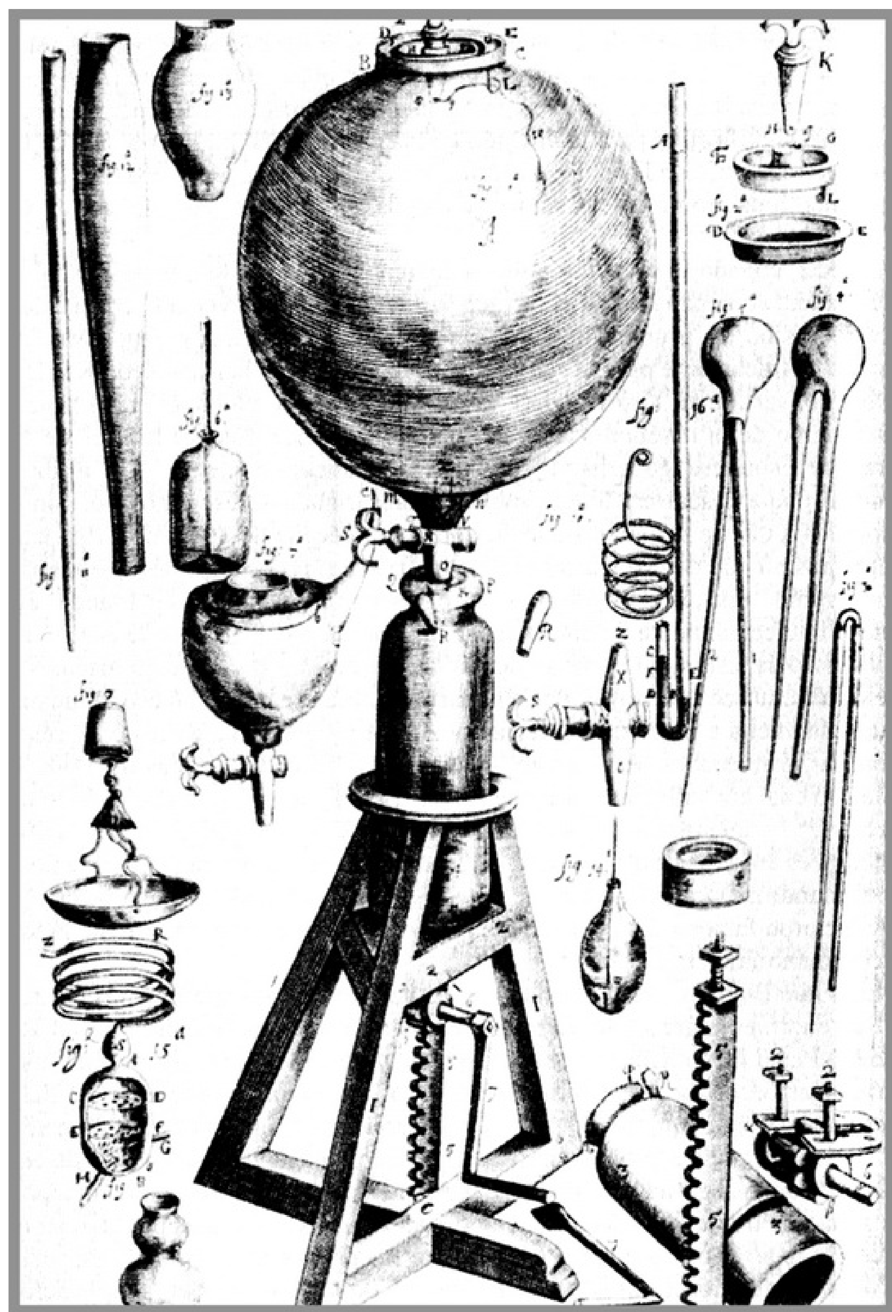
era modesta para lo que acostumbraba a tener la familia y que procedía de sus propiedades, a pesar de la guerra, pudo dedicarse a leer cosas muy diversas (incluido un minucioso estudio de la Biblia), a escribir sobre una amplia gama de temas (filosofía, el sentido de la vida, religión) y a realizar sus propios experimentos, que en aquella época se centraban sobre todo en la alquimia. Numerosas cartas que escribió a Katherine proporcionan información sobre su vida en Dorset y, en una carta dirigida a otro amigo, menciona un arma que podía utilizar la fuerza del aire comprimido para disparar una bala de plomo capaz de matar a un hombre a una distancia de treinta pasos —una observación que pone de manifiesto claramente la línea de pensamiento que le llevaría a descubrir lo que denominamos la ley de Boyle—. La propia Katherine era una mujer independiente e inteligente, y su casa de Londres se convirtió en un lugar de reunión para muchos intelectuales de la época, incluido un grupo de hombres interesados por la ciencia, que al principio se llamó el «college invisible». Este fue el grupo precursor de la Royal Society y, por mediación de Katherine, Robert comenzó durante sus visitas a Londres a entablar relación con estos hombres. Durante sus primeros años de existencia (hacia mediados de la década de 1640) el grupo se reunió a menudo en el no tan invisible Gresham College de Londres. Este *college* había sido fundado en 1596 por sir Thomas Gresham, un asesor financiero de la reina Isabel I, con la idea de crear por primera vez, fuera de Oxford y Cambridge, un lugar donde se impartiera enseñanza a un nivel avanzado. Nunca llegó a ser un rival para aquellas dos instituciones, pero su creación fue un paso significativo para la difusión de la enseñanza en Inglaterra. Sin embargo, el centro de las actividades del *college* invisible se desplazó a Oxford cuando varios de sus miembros prominentes asumieron cargos allí en 1648, cuando la guerra civil llegó a su fin.

En 1652, cuando la situación política aparentemente se había estabilizado, Boyle visitó Irlanda, acompañado por el médico William Petty, para ver cuál era el estado de sus negocios en las propiedades que la familia tenía allí. Las perspectivas habían mejorado políticamente para la familia, porque uno de los hermanos de Robert, que se había convertido en lord Broghill, había desempeñado un papel importante en el aplastamiento de la rebelión irlandesa, lo cual implicaba obtener favores de quienquiera que estuviese gobernando Inglaterra en aquel momento —lo último que Cromwell podía desear era tener problemas con Irlanda—. Sin embargo, con todos los conflictos que se habían producido durante la década de 1640, no había existido ninguna posibilidad de restablecer el flujo de ingresos procedente de aquellas propiedades. Durante dos años, Boyle pasó la mayor parte del tiempo en Irlanda, beneficiándose intelectualmente de una estrecha asociación con Petty, que le enseñó anatomía y fisiología, así como el modo de realizar disecciones, y también discutió sobre el método científico con Boyle. Por otra parte, también se benefició económicamente, ya que a su vuelta a Inglaterra se le garantizó que recibiría una parte de las rentas de las últimas propiedades de su padre: dichas rentas ascendían a más de 3000 libras anuales, lo cual era suficiente para que Robert Boyle pudiera vivir haciendo lo más le apeteciera.[12] Lo que más le apeteció en 1654, a los 27 años de edad, fue irse a Oxford, que entonces era el centro de la actividad científica en Inglaterra (y posiblemente de todo el mundo). Durante los catorce años siguientes, realizó los trabajos científicos que le hicieron famoso. La mansión de Stallbridge pasó a ser propiedad de la familia de su hermano Francis.

No es que Boyle tuviera necesidad de realizar todos los experimentos por sí mismo. Sus enormes ingresos le permitían emplear ayudantes (incluido un tal Robert Hooke, del cual luego hablaremos mucho más) y llevar lo que llegó a ser un insti-

tuto de investigación privado que actualmente sería la envidia de muchos científicos. El dinero hacía también que Boyle pudiera, a diferencia de muchos de sus contemporáneos, conseguir que sus propios libros se publicaran, pagándose los gastos de edición él mismo, con la seguridad de que aparecerían en un breve plazo y en ediciones con una calidad de impresión adecuada. Dado que pagaba sus facturas puntualmente, los impresores le tenían un gran afecto y trataban sus obras con un cuidado especial.

Con su institución científica, Boyle fue uno de los pioneros en la aplicación del método científico, siguiendo la línea de hombres prácticos como Galileo o Gilbert, que habían hecho sus propios experimentos, y también inspirándose en algo más filosófico, como era la obra de Francis Bacon (1561-1626), del que no se puede decir realmente que hiciera muchos experimentos,[13] pero cuyos escritos sobre el método científico tuvieron una gran influencia en las generaciones de científicos británicos que llegaron después de él. Bacon explicó la necesidad de comenzar cualquier investigación recogiendo el máximo número posible de datos, e intentar explicar todas las observaciones —nunca empezar soñando con alguna idea maravillosa y luego buscar los hechos que la justifiquen—. Cuando estaba escribiendo acerca de los trabajos de Galileo sobre la caída de los cuerpos, y el descubrimiento de los cuerpos de distinto peso caen a la misma velocidad, Boyle puso esto de ejemplo del modo en que, como científicos, «nosotros nos atenemos a la experiencia, incluso cuando la información que esta nos da parece contradecir lo que nos sugiere la razón».[14]

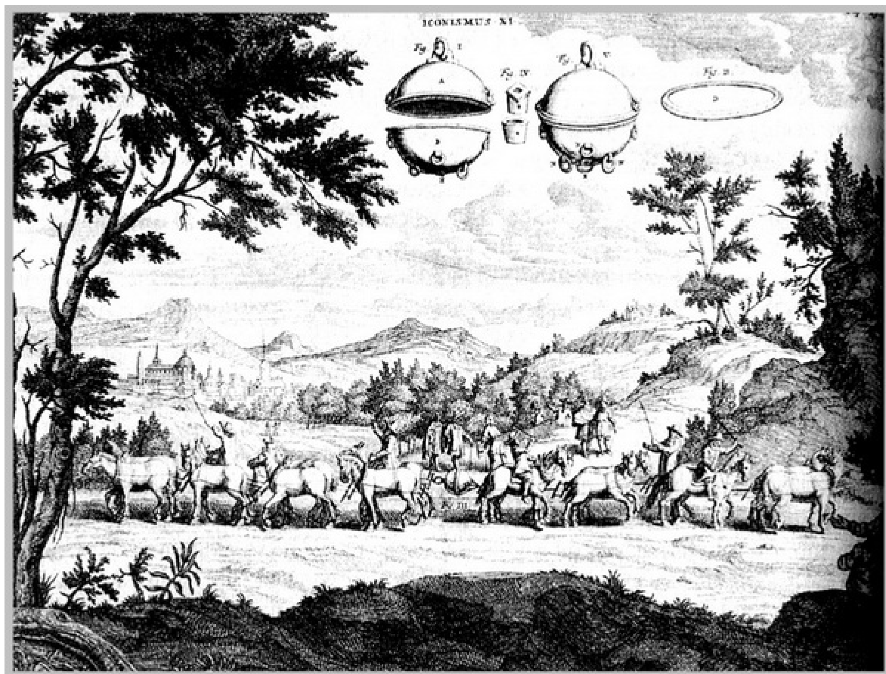


11. Aparato de Robert Boyle, incluida su bomba de aire.

Pasaron seis años hasta que Boyle publicó por fin algo sobre la ciencia, pero cuando lo hizo quedó claro que la espera había valido la pena. Su primera contribución importante a la ciencia se refería a la elasticidad, o compresibilidad, del aire e incluía el más famoso experimento de su espléndida carrera. En este experimento, Boyle (o su ayudante) tomó un tubo de cristal en forma de J, con el extremo superior abierto y el brazo más corto cerrado. Se vertió mercurio en este tubo hasta llenar la vuelta en forma de u de la parte inferior, y el aire quedó encerrado en el brazo más corto del tubo. Cuando el mercurio llegaba al mismo nivel en los dos lados del tubo, el aire del extremo cerrado se encontraba a presión atmosférica. Pero, vertiendo más mercurio en el brazo largo del tubo, la presión podía aumentar, haciendo que se contrajera el aire encerrado en el brazo corto del tubo. Boyle descubrió que, si la presión aumentaba al doble, el volumen del aire encerrado se reducía a la mitad; si la presión aumentaba al triple, el volumen del aire encerrado se reducía a la tercera parte; y así sucesivamente. Fue igualmente importante su descubrimiento de que aquel proceso era reversible. Después de haber estado comprimido, el aire volvería a su volumen inicial, si se le daba una oportunidad. Todo esto se puede explicar muy bien en el marco del modelo atómico del mundo, pero las dificultades son mucho mayores si se utilizan los vórtices cartesianos.

Gran parte de estos trabajos (y otros más, en los que se utilizaban aparatos tales como bombas de aire y se estudiaba el problema de elevar agua mediante succión) se publicó en 1660 en su libro *New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air and its Effects* (*Nuevos experimentos físico-mecánicos, relacionados con la elasticidad del aire y sus efectos*), al que en general nos referimos denominándolo sencillamente *The Spring of the Air* (*La elasticidad del aire*). En la primera edición no se enunciaba explícitamente lo que hoy en día conocemos como

ley de Boyle, según la cual el volumen que ocupa un gas es inversamente proporcional a la presión a la que está sometido (cuando las demás condiciones permanecen invariables), que si se enunciaba en la segunda edición publicada en 1662. Los trabajos de Boyle con el vacío (en sentido estricto, una presión muy baja del aire) se realizaron mediante una bomba de aire perfeccionada, que se basaba en las teorías de Otto von Guericke, y que Boyle diseñó y construyó conjuntamente con Hooke. Mientras que la bomba de Von Guericke tenía que ser manejada por dos hombres fuertes, la que diseñaron Boyle y Hooke podía manejarse con bastante facilidad y para ello sólo era necesario un hombre. Boyle repitió todos los experimentos de Von Guericke y, además, demostró que el agua hierve a una temperatura inferior cuando se reduce la presión del aire (no fue un logro insignificante, ya que había que colocar un barómetro de mercurio dentro del recipiente de cristal sellado, de tal modo que se pudiera controlar el descenso de la presión a medida que el aire se bombeaba hacia afuera). Boyle estuvo también a punto de descubrir el oxígeno demostrando que la vida, como una llama, dependía de la presencia de aire para subsistir, y señaló específicamente que existían unas similitudes esenciales entre los procesos de respiración y combustión.



12. Experimento realizado en Magdeburgo, Alemania, en 1654. Dieciséis caballos fueron incapaces de separar las dos mitades de una esfera vacía, en contra de la presión atmosférica. *Experimenta Nova*, de Guericke, 1672.

Algunos de estos experimentos no eran para personas de estómago delicado, pero ciertamente conseguían que la gente quedara asombrada y prestara atención. Uno de los colegas de Boyle perteneciente también al *college* invisible (no sabemos con seguridad quién era) compuso una «balada» sobre una demostración de los trabajos científicos del grupo, de la cual hemos extraído los siguientes versos:

Al agente danés se le demostró luego
que donde no hay aire, no hay aliento.
Este secreto lo dio a conocer una campana
de cristal en la que un gato acabó muriendo.
Cuando se sacó el aire fuera del cristal,
el minino murió, sin tan siquiera maullar.

La misma campana de cristal dejó claro asimismo
otro secreto aún más profundo:

que nada excepto el aire que llega hacia el oído
puede ser el medio por el que se propaga el sonido,
pues en la campana vaciada de aire
no se oye un reloj que está dando la hora.[*]

Puede que no sea una gran poesía, pero sirve para que nos hagamos una idea de lo impresionado que estaba el mundo científico con los descubrimientos de Boyle.[15] El hecho de que el libro se publicara en inglés y estuviera escrito en una prosa clara y accesible fue casi tan importante como su contenido. Al igual que Galileo, Boyle acercó la ciencia a las masas (o al menos a las clases medias; en su famoso diario, Samuel Pepys escribe con entusiasmo sobre el placer de sumergirse en uno de los nuevos libros de Boyle). Sin embargo, a diferencia de Galileo, Boyle no tenía que temer que su obra pudiera disgustar a la Inquisición.

Planteamiento científico de Boyle para la alquimia

En 1661, entre las dos primeras ediciones de *The Spring of the Air*, Boyle publicó su libro más famoso: *The Sceptical Chymist (El químico escéptico)*. Todavía es una cuestión a debate hasta qué punto Boyle estuvo implicado en la alquimia después de marcharse de Dorset. Lawrence Principe, de la Universidad John Hopkins, ha explicado convincentemente que no era tanto que Boyle estuviera intentando dejar a un lado la alquimia en favor de lo que actualmente llamaríamos química, sino que más bien intentaba introducir el método de Bacon en la alquimia —para hacer que la alquimia fuera científica, como si pudiera serlo—. Esto encaja perfectamente con su lugar en la historia como hombre de ciencia del siglo XVII (incluso Isaac Newton, como ya veremos, estuvo seriamente implicado en trabajos de alquimia a finales del siglo XVII), y sería una equivocación decir que el libro de Boyle transformó la alquimia en química de la

noche a la mañana. De hecho, inicialmente tuvo mucha menos influencia que *The Spring of the Air*. Sin embargo, cuando se desarrolló la química en los siglos XVIII y XIX, los estudiosos empezaron a consultar el libro de Boyle, considerándolo como un punto de inflexión. El hecho es que la aplicación del método científico a la alquimia consiguió finalmente que la alquimia se convirtiera en la química y suprimió las bases racionales en que pretendían apoyarse ciertas creencias, como la de la piedra filosofal, que supuestamente serviría para convertir los metales en oro. En cualquier caso, Boyle fue una luz que guió la implantación del método científico en Inglaterra.

THE

SCEPTICAL CHYMIST:

OR

CHYMICO-PHYSICAL

Doubts & Paradoxes,

Touching the

SPAGYRIST'S PRINCIPLES

Commonly call'd

HYPOSTATICAL;

As they are wont to be Propos'd and Defended by the Generality of

ALCHYMISTS.

Whereunto is præmis'd Part of another Discourse relating to the same Subject.

BY

The Honourable *ROBERT BOYLE*, Esq;

LONDON,

Printed by *J. Cadwell* for *J. Crooke*, and are to be Sold at the *Ship* in St. *Paul's* Church-Yard.

MDCLXI.

13. P[illegible] *The Sceptical Chymist*, by Robert Boyle, 1661

13. Portada de *The Sceptical Chymist*, de Robert Boyle, 1661.

Un ejemplo de cómo Boyle abordó la alquimia de un modo científico es que partió de la idea de que se podía obtener oro limpiando de impurezas otros metales. Argumentó de la siguiente manera: dado que el oro es más denso que estos otros metales, ¿cómo es posible que se obtenga retirando algo de ellos? Observe el lector que no dijo que la transmutación fuera imposible; sin embargo, planteó el problema científicamente. No obstante, después de llevar a cabo experimentos que lo desmentían, lo que sí dijo es que era imposible aceptar la vieja teoría según la cual el mundo estaría formado por los cuatro «elementos» aristotélicos —aire, tierra, fuego y agua— mezclados en diferentes proporciones. En cambio, suscribió en cierta manera la hipótesis de los átomos, al decir que toda la materia está formada por cierto tipo de partículas diminutas que se unen unas a otras de formas diferentes —una versión primitiva de la idea de elementos y compuestos, según el significado moderno de estos términos—. Boyle escribió lo siguiente: «Cuando digo elementos, me refiero a ciertos cuerpos primitivos y simples, que, no estando formados por otros cuerpos, ni los unos a partir de los otros, constituyen los ingredientes de los cuales se componen de manera inmediata todos los cuerpos llamados perfectamente mixtos y en los cuales se resuelven en última instancia». Este tema aparece desarrollado por Boyle en su libro *Origin of Forms and Qualities* (*Origen de las formas y las cualidades*), publicado en 1666, y Boyle sugiere que estos átomos pueden moverse libremente dentro de los fluidos, pero se encuentran en reposo en los sólidos, y que sus formas son importantes para determinar las propiedades de los objetos materiales que componen. Pensaba que la tarea principal de la química era averiguar de qué están hechas las cosas, y acuñó la expresión análisis químico para referirse a este proceso.

Todo esto constituye tan sólo una pequeña parte del trabajo de Boyle, aunque es la parte más importante para la historia del

desarrollo de la ciencia en el siglo XVII. Tomando más o menos al azar algunos otros ejemplos, diremos que inventó los fósforos, que lo hizo mejor que Bacon en cuanto a utilizar el frío para conservar la carne sin pillar un resfriado, y demostró experimentalmente que el agua se dilata al congelarse. Fue también una importante figura literaria del período denominado Restauración, y escribió sobre muchos temas, incluidas obras de ficción. Sin embargo, aunque llegó a ser el científico más respetado de su tiempo, Boyle conservó su carácter retraído y modesto, declinando muchos honores. Al igual que a sus tres hermanos supervivientes, a Robert Boyle se le ofreció un título de nobleza después de la restauración de Carlos II (el cual, no lo olvidemos, contaba entre sus amantes con la esposa de Francis Boyle).[16] Pero, a diferencia de sus hermanos, Robert Boyle no aceptó el título. Su fama como teólogo era tal, que el lord canciller de Inglaterra le pidió que tomara las órdenes sagradas, con la promesa de que accedería rápidamente a un obispado, pero Robert Boyle dijo «no, gracias». Se le ofreció el cargo de preboste en Eton, pero lo rechazó. Además, cuando fue elegido presidente de la Royal Society, en 1680, dijo que no podía aceptar el cargo porque sus creencias religiosas personales le impedían formular el juramento requerido. A lo largo de toda su vida fue «el honorable señor Robert Boyle» y repartió buena parte de sus elevadísimos ingresos mediante donaciones caritativas (cuando murió, también dejó la mayoría de sus propiedades a la beneficencia).

Cuando la Royal Society recibió sus estatutos en 1662, Boyle no era sólo unos de los primeros miembros (o *fellows*, como se les llamaba), sino uno de los primeros miembros de la junta de gobierno de esta sociedad. En parte debido a que el centro de la actividad científica que se realizaba en Inglaterra llegó a estar estrechamente vinculado con la Royal Society de Londres durante la década de 1660, y en parte para estar con su hermana,

Boyle se trasladó a la capital en 1668 y se instaló allí con Katherine. Sus grandes días de investigador científico habían pasado ya (aunque siguió realizando experimentos), pero permaneció en el centro de la escena científica, y la casa de Katherine fue siempre un lugar en el que se reunían intelectuales. Uno de los contemporáneos de Boyle fue John Aubrey, que describe al Robert Boyle de aquella época de la siguiente manera:

> Muy alto (más de 1,80 metros de estatura) y erguido, muy templado, virtuoso y frugal: un soltero; posee un carruaje; vive con su hermana, lady Ranulagh. Su mayor placer es dedicarse a la química. Tiene en la residencia de su hermana un buen laboratorio y varios sirvientes (aprendices que trabajan con él) para atenderlo. Es caritativo con los hombres de ingenio que están necesitados.

Sin embargo, la salud de Boyle nunca fue buena. El diarista John Evelyn, un viejo amigo, describe el aspecto de Boyle en sus últimos años de la siguiente manera:

> La contextura de su cuerpo, cuando su salud estaba en los mejores momentos, me parecía tan delicada que con frecuencia lo he comparado con un cristal, o más bien con el cristal de Venecia; éste, aunque nunca se trabaje tan delgado y fino, si se elaborara con cuidado, duraría más que los metales más duros de uso cotidiano. Además, era, sin embargo, tan claro y cándido que nunca hubo defecto o tacha que manchara su reputación.

El cristal de Venecia sólo duró lo que duró su acompañante. Poco antes de las Navidades de 1691, Katherine murió; Robert Boyle la siguió sólo una semana más tarde, el 30 de diciembre, cuando le faltaba menos de un mes para cumplir los 65 años. Después del funeral, el 6 de enero de 1691, Evelyn escribió en su diario: «Ciertamente, no sólo Inglaterra, sino todo el mundo de la cultura sufrió una pérdida al desaparecer este hombre grande y bueno, que también era para mí un valioso amigo personal».

Los experimentos en los que Boyle demostraba que tanto el fuego como la vida dependían de algo que estaba en el aire, enlazaban su obra con otro hilo fundamental del desarrollo científico de la segunda mitad del siglo XVII: la investigación bioló-

gica sobre los seres humanos y otros organismos vivos según los trabajos que habían realizado Harvey y Descartes. Como sucede frecuentemente en la ciencia, estos nuevos avances llegaron de la mano de nuevos avances tecnológicos. Del mismo modo que el telescopio revolucionó la manera de reflexionar sobre el universo, el microscopio revolucionó el modo en que las personas pensaban sobre sí mismas. El primer gran pionero de la microscopía fue el físico italiano Marcello Malpighi, nacido en Crevalcore, cerca de Bolonia, probablemente el 10 de marzo de 1628 (al menos, éste fue el día en que lo bautizaron).

Marcello Malpighi y la circulación de la sangre

Malpighi estudió filosofía y medicina en la Universidad de Bolonia, graduándose allí en 1653, y fue profesor de lógica en Bolonia, antes de trasladarse a la Universidad de Pisa en 1656, para trabajar como profesor de medicina teórica. Sin embargo, el clima de Pisa no le sentaba bien, y en 1659 regresó a Bolonia para enseñar medicina. En 1662, se trasladó de nuevo, esta vez a la Universidad de Messina, pero en 1666 consiguió la cátedra de medicina en Bolonia y permaneció allí durante los 25 años siguientes. En 1691, Malpighi se trasladó a Roma, donde vivió retirado de la enseñanza pero se convirtió en el médico personal del papa Inocencio XII (según parece, accediendo a regañadientes ante la insistencia del Papa); falleció allí el 30 de noviembre de 1694.

A partir de 1667, una gran parte de los trabajos de Malpighi fueron publicados por la Royal Society en Londres, lo cual indicaba la importancia que había adquirido ya la Royal Society por aquel entonces (en 1669, Malpighi fue el primer italiano que resultó elegido miembro de la Royal Society). Su obra se centraba casi exclusivamente en la microscopía y trataba toda una diversidad de temas, entre los cuales cabe resaltar la circu-

lación de la sangre a través de las membranas de las alas de un murciélago, la estructura de los insectos, el desarrollo de los embriones de los pollos y la estructura de los estomas en las hojas de las plantas. Pero la mayor contribución de Malpighi a la ciencia surgió como resultado de los trabajos que llevó a cabo en Bolonia en 1660 y 1661, y la información al respecto apareció en dos cartas que se publicaron en 1661.

Con anterioridad a aquel momento y como consecuencia del descubrimiento de la circulación de la sangre, se había pensado de una forma generalizada que la sangre procedente del corazón y que fluye hacia los pulmones salía en realidad de unos diminutos orificios existentes en los vasos sanguíneos e iba a parar a los espacios llenos de aire que hay dentro de los pulmones, que allí se mezclaba de algún modo con el aire (por razones que seguían sin estar claras) y luego regresaba de alguna manera a través de orificios diminuto a los vasos sanguíneos, para volver por estos al corazón. A través de estudios microscópicos de los pulmones de las ranas, Malpighi descubrió que, en realidad, la superficie interior de los pulmones está recubierta de diminutos capilares que se encuentran muy cerca de la superficie de la piel y mediante los cuales las arterias se conectan directamente con las venas. Había descubierto el eslabón perdido que faltaba en la descripción que hizo Harvey de la circulación sanguínea, un eslabón cuya existencia el propio Harvey había sospechado, pero que no consiguió detectar con los instrumentos de que disponía. «Pude ver claramente», escribió Malpighi, «que la sangre se divide y fluye a través de vasos tortuosos, y que no se vierte en espacio alguno, sino que siempre es conducida a través de pequeños tubos y distribuida por las múltiples flexiones de los vasos». Unos pocos años más tarde, el microscopista holandés Antoni van Leeuwenhoek (del cual sabremos más en el capítulo 5) hizo de forma independiente el mismo descubrimiento, sin tener conocimiento del

trabajo realizado por Malpighi. Poco después de que Malpighi llevara a cabo este descubrimiento, Richard Lower (1631-1691) , miembro de aquel grupo de Oxford que luego se convertiría en el núcleo de la Royal Society, demostró mediante una serie de experimentos (incluido uno, bastante sencillo, consistente en agitar un conducto de cristal que contenía sangre venosa y observar que aquella sangre de color púrpura oscuro cambiaba a un rojo brillante cuando se mezclaba con aire) que el color rojo de la sangre que fluye desde los pulmones y el corazón por todo el cuerpo se debía a algo contenido en el aire:

> Que este color rojo se debe exclusivamente a la penetración de partículas de aire en la sangre, es una cuestión que está bastante clara a partir del hecho de que, mientras la sangre se vuelve roja en su totalidad dentro de los pulmones (porque el aire se propaga por ellos a través de todas las partículas, y por lo tanto se mezcla completamente con la sangre), cuando la sangre venosa se recoge en un vaso, su superficie toma un color escarlata debido a la exposición al aire.[17]

A partir de investigaciones como ésta (Boyle y Hooke fueron contemporáneos de otras personas que llevaron a cabo experimentos similares), el grupo de Oxford comenzó a considerar la sangre como una especie de fluido mecánico que transportaba por todo el cuerpo partículas esenciales obtenidas de los alimentos y del aire. Esta idea encajaba perfectamente en la imagen cartesiana que contemplaba el cuerpo como una máquina.

GIOVANNI BORELLI Y EDWARD TYSON: SE PERFILA CADA VEZ MÁS NÍTIDAMENTE LA IDEA QUE EL ANIMAL (Y EL HOMBRE) FUNCIONA COMO UNA MÁQUINA

El tema del cuerpo considerado como una máquina fue desarrollado en el siglo mal por otro italiano, Giovanni Borelli, que fue contemporáneo y amigo de Malpighi, pero de más edad que éste. Parece ser que Malpighi fomentó el interés de Borelli por los seres vivos, mientras que Borelli parece haber animado

a Malpighi a investigar el funcionamiento de los sistemas vivos y haber fomentado sus esfuerzos en el trabajo de disección. Ambos lograron hacer más cosas de las que podrían haber hecho en el caso de no haberse conocido.

Nacido en Castelnuovo, cerca de Nápoles, el 28 de enero de 1608, Borelli estudió matemáticas en Roma y llegó a ser profesor de matemáticas en Messina en algún momento anterior a 1640, aunque no se conoce la fecha exacta. Conoció a Galileo en la casa en que éste residía fuera de Florencia a principios de la década de 1640 y en 1656 llegó a ser profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa (el antiguo puesto de trabajo de Galileo), donde conoció a Malpighi. Ambos fueron miembros fundadores de aquella Accademia del Cimento, que fue fundada en Florencia al año siguiente y que existiría durante tan poco tiempo. Por esta época, Borelli estaba estudiando anatomía. Regresó a Messina en 1668, pero en 1674 se vio involucrado (o fue sospechoso de implicación) en intrigas políticas, por lo que fue enviado al exilio a Roma, donde llegó a formar parte de un círculo relacionado con la antigua reina Cristina de Suecia (la que había obligado a Descartes a levantarse de la cama a unas horas tan intempestivas). Cristina de Suecia había sido obligada a abdicar en 1654, al haberse convertido al catolicismo, y también vivía exiliada en Roma donde Borelli murió el 31 de diciembre de 1679.

Aunque Borelli fue un matemático notable, que había sido el primero en sugerir que la trayectoria de un cometa por delante del Sol sigue una trayectoria parabólica, y que intentó explicar el movimiento de las lunas de Júpiter planteando que este planeta ejerce sobre sus satélites una influencia similar a la que ejerce el Sol sobre los planetas, su obra científica más importante se desarrolló en el campo biológico de la anatomía. Estos trabajos se llevaron a cabo en su mayor parte mientras estaba en Pisa, pero seguían estando sólo en forma de manuscrito

cuando Borelli murió; el libro resultante, titulado *De Motil Animalium (Sobre el movimiento de los animales)* se publicó después de su muerte, en dos volúmenes que aparecieron en 1680 y 1681. Borelli consideraba el cuerpo como un sistema de palancas accionadas por las fuerzas que ejercen los músculos, y analizó geométricamente el modo en que actúan los músculos del cuerpo humano al andar y al correr. También describió el vuelo de los pájaros y el movimiento natatorio de los peces en términos matemáticos. Pero la característica crucial de su obra es que no buscó para el género humano un lugar especial, distinto del de otros animales. El cuerpo humano se comparaba con una máquina formada por una serie de palancas. Sin embargo, Borelli no dejó de ver el papel que había desempeñado Dios como el primer artífice que había creado este sistema —algo así como el diseñador de la máquina—. No obstante, esta concepción era muy diferente de la idea de un cuerpo humano accionado por algún tipo de espíritu director que controlaba sus actividades minuto a minuto.

La relación entre el hombre (como lo habrían expresado en aquella época) y los animales quedó establecida y explicada a partir de un notable (aunque algo fortuito) trabajo de disección llevado a cabo por Edward Tyson, en Londres, justo al final del siglo Tyson nació en Clevedon, Somerset, en 1650 (no se conoce la fecha exacta) y estudió en la Universidad de Oxford (donde obtuvo la licenciatura en humanidades en 1670 y el doctorado en 1673) y asimismo en la de Cambridge, donde se graduó en medicina en 1677. A continuación se trasladó a Londres, donde ejerció como médico, pero además llevó a cabo observaciones anatómicas y disecciones, publicando buena parte de sus trabajos en la *Philosophical Transactions* de la Royal Society, sociedad de la que fue elegido miembro en 1679. Siendo uno de los médicos más destacados de su tiempo (llegó a ser miembro del Royal College of Physicians), en 1684 Tyson fue nombrado

médico y director del Bethlehem Hospital de Londres. Se trataba de una institución para enfermos mentales, de la que procede la palabra *bedlam «casa de locos»*, que es la forma vulgar de pronunciar su nombre y que nos da una idea de cómo era este lugar cuando Tyson asumió las funciones de su cargo. Aunque este hospital fue el primer asilo para enfermos mentales que existió en Gran Bretaña (y el segundo de Europa, después de uno que se fundó en la ciudad española de Granada), difícilmente se puede decir que fuera un lugar de reposo. Los enfermos mentales sufrían casi todos los abusos que podamos imaginar y eran tratados como una especie de atracción de feria, siendo «Bedlam» un lugar donde la gente elegante iba a ver fenómenos curiosos, algo parecido a un zoo. Tyson fue el primero que empezó a introducir cambios en todo ello, contratando enfermeras que cuidaran de los pacientes en lugar de unos enfermeros que en realidad no eran sino carceleros, creando un fondo para proveer de ropa a los enfermos más pobres y llevando a cabo otras reformas. En el aspecto humano, éste fue el logro más importante de Tyson. Falleció en Londres el 1 de agosto de 1708.

Sin embargo, en el aspecto científico, Tyson está considerado como el padre fundador de la anatomía comparada, que estudia las relaciones físicas existentes entre las distintas especies. Una de sus disecciones más memorables tuvo lugar en 1680, cuando una infortunada marsopa subió por el río Támesis y acabó en manos de un pescadero que se la vendió a Tyson por 7 chelines y 6 peniques (una suma que le fue reembolsada por la Royal Society). Tyson hizo la disección del supuesto «pez» en el Gresham College, estando presente Robert Hooke para hacer dibujos a medida que se iba realizando la disección, y se quedó atónito al descubrir que el animal era en realidad un mamífero, con una estructura interna muy similar a la de los cuadrúpedos que vivían en tierra. En su libro *Anatomy of a Por-*

pess (*Anatomía de una marsopa*), publicado posteriormente aquel mismo año, presentó este descubrimiento a un público que se quedó atónito:

> La estructura de las vísceras y las partes interiores tienen una analogía y un parecido tan grandes con las de los cuadrúpedos, que parecen ser casi lo mismo. La diferencia más notable con éstos parece estar en la forma exterior y en la carencia de patas. Pero en esto también observamos que, cuando se había retirado la piel y la carne, las aletas delanteras tenían un aspecto que bien podía ser el de unos brazos, ya que existía una *scapula*, un *os humen*, la *ulna* y el *radius*, además del hueso del *carpus*, el *metacarp*, y 5 *digiti* curiosamente unidos…

Esto indicaba —prácticamente garantizaba— una relación entre los animales más estrecha de lo que podrían sugerir sus apariencias externas. Tyson realizó muchas otras disecciones famosas, incluida la de una serpiente de cascabel y la de un avestruz. Pero, la más famosa de todas fue la de un joven chimpancé (descrito equivocadamente como un orangután) que fue llevado a Londres como mascota por un marinero en 1698. El joven chimpancé había resultado herido durante el viaje desde África y era evidente que sufría dolores; pronto llegaron noticias de esto a los oídos del famoso anatomista, que aprovechó la oportunidad para estudiar el aspecto y el comportamiento del chimpancé mientras éste estuvo con vida, y para diseccionarlo en cuanto murió (esta vez con William Cowper[18] realizando los dibujos). Los resultados de sus trabajos aparecieron en un libro que llevaba un título espléndido: *Orangoutang, sive Homo Sylvestris: or the Anatomy of a Pygmie Compared with that of a Monkey, an Ape, and a Man*. Este libro profusamente ilustrado, con 165 páginas, presentaba pruebas irrefutables de que los seres humanos y los chimpancés estaban formados con el mismo esquema corporal. Al final del libro, Tyson hacía una lista de las características más importantes de la anatomía del chimpancé, señalando que 48 de ellas se parecían a las características equivalentes del ser humano más que a las de un mono, y 27 se parecían mucho más a las de un mono que a las de un

ser humano. Dicho de otra manera, el chimpancé se parecía a un ser humano más que a un mono. Tyson quedó impresionado sobre todo por el modo en que el cerebro del chimpancé se parecía (además de por su tamaño) al cerebro de un ser humano.

El factor de suerte en el análisis de Tyson reside en el hecho de que el espécimen que examinó era un chimpancé joven, y los seres humanos se parecen más a las crías de los chimpancés que a los chimpancés adultos. Hay una razón lógica que explica esto, aunque no se ha comprendido hasta tiempos bastante recientes —uno de los modos en que la evolución puede producir variaciones en cuestiones ya antiguas, es frenando el proceso de desarrollo, algo que se conoce como neotenia (que significa el hecho de mantenerse joven)—. Las personas nos desarrollamos mucho más lentamente que los chimpancés y otros monos, de tal forma que nacemos en un estado relativamente subdesarrollado —lo cual es una de las razones por las cuales las crías de los humanos son tan indefensas, pero también la razón por la que son capaces de aprender tanta cosas diferentes— en vez de llegar al mundo programados previamente para realizar unas funciones específicas (tales como ir saltando de un árbol a otro). Pero hablar de esto es adelantar acontecimientos en mi relato. En 1699, lo importante fue que con la publicación del libro de Tyson se estableció claramente el lugar de los seres humanos como parte del reino animal, fijando ya el programa que se seguiría durante siglos de trabajo para llegar a una comprensión exacta del modo en que encajamos en dicho reino animal. Esto, por supuesto, será un tema importante en la última parte de este libro. Sin embargo, ahora es el momento de examinar la obra de Isaac Newton, el hombre que hizo más que ningún otro para establecer el programa que se habría de seguir durante los siglos siguientes, y asimismo debemos comentar también los logros de los contemporáneos más cercanos a Newton.

Capítulo 5

LA «REVOLUCIÓN NEWTONIANA»

Las tres personas que implantaron tanto el método científico en sí mismo, como la preeminencia de la ciencia británica a finales del siglo XVII fueron Robert Hooke, Edmond Halley e Isaac Newton. Debido, en cierta medida, a la enorme altura de los logros de los otros dos científicos, Halley queda clasificado por su contribución a la ciencia como el tercero en importancia dentro de este trío; sin embargo, a pesar de que el carro triunfal de Newton ha estado rodando en cabeza durante trescientos años (y fue el propio Newton quien le dio el empuje inicial después de la muerte de Hooke), es imposible para un historiador imparcial decir si fue Newton o Hooke quien realizó la contribución más significativa. Newton fue un solitario que trabajó aislado y demostró la verdad única y profunda de que el universo se rige por principios matemáticos; Hooke fue un científico gregario y de amplio espectro, que encontró una deslumbrante variedad de ideas nuevas, aparte de hacer más que ningún otro para que la Royal Society dejara de ser un mentidero para caballeros y se convirtiera en el arquetipo de una sociedad científica. Su desgracia fue ganarse la enemistad de Newton y morir antes que él, dando así a su viejo enemigo una oportunidad para reescribir la historia —cosa que Newton hizo de una manera tan efectiva que Hooke no ha podido ser rehabilitado hasta hace unas pocas décadas—. En parte por poner a Newton

en su sitio, y también porque Hooke nació antes que los otros dos componentes del trío, comenzaré con el relato de su vida y obra, y presentaré a Newton y Halley en el contexto de sus relaciones con Hooke.

Robert Hooke: el estudio de la microscopía y la publicación de «Micrographia»

Robert Hooke nació con las campanadas del mediodía del 18 de julio de 1635, siete años antes de que muriera Galileo Galilei. Su padre, John Hooke, era coadjutor de la iglesia de Todos los Santos de Freshwater, una localidad de la isla de Wight; este cargo era uno de los mejor remunerados de la isla, pero el principal beneficiario era el párroco, George Warburton. Como simple coadjutor, John Hooke estaba lejos de poder considerarse rico y, además, cuando nació Robert, ya tenía otros dos hijos: Katherine, nacida en 1628, y John, nacido en 1630. El hermano mayor de Robert Hooke llegó a ser tendero en Newport, donde ejerció de alcalde durante algún tiempo, pero se suicidó ahorcándose a los 46 años de edad —no sabemos exactamente por qué—. Su hija Grace, sobrina de Robert, tendría posteriormente una gran influencia en la vida de su tío.

Robert Hooke fue un niño enfermizo, por lo que no se esperaba que sobreviviera. Se dice que durante los primeros siete años de su vida se alimentó casi exclusivamente de leche y productos lácteos, además de fruta, «sin nada de carne, dada su débil constitución».[1] Sin embargo, aunque era pequeño y delgado, y carecía de fuerza física, era un muchacho activo que disfrutaba corriendo y saltando. Fue más tarde, a los 16 años de edad, cuando desarrolló una pronunciada deformación corporal, una especie de contorsión, que él mismo atribuyó más tarde al hecho de haber pasado largas horas encorvado trabajando en un torno o con otras herramientas. Llegó a ser muy hábil ha-

ciendo maquetas, entre ellas la de un barco de aproximadamente un metro de longitud con aparejos y velas. Además, en una ocasión, después de haber visto un viejo reloj de latón hecho pedazos, hizo un reloj de madera que funcionaba.

Inicialmente, debido a su mala salud, la educación formal de Hooke fue descuidada. Cuando pareció que había una posibilidad de que, a pesar de todo, sobreviviera, su padre comenzó a enseñarle cosas rudimentarias, con la intención de que hiciera carrera en la Iglesia. Sin embargo, las continuas enfermedades de Robert y los achaques de su padre, que iban en aumento, hicieron que su educación avanzara muy poco y, en gran medida, continuaban dejándole que se las arreglara solo. En una ocasión en que un artista profesional visitó Freshwater para realizar un encargo, Hooke observó cómo hacía este artista su trabajo y decidió que él podía hacer lo mismo, por lo que, después de haber estado haciendo sus propias pinturas, empezó a copiar todas las que podía encontrar, con tanta habilidad que se pensó que podría convertirse él también en un pintor profesional. En 1648, cuando su padre falleció tras una larga enfermedad, Robert Hooke tenía sólo 13 años de edad. Con una herencia de 100 libras en el bolsillo, fue enviado a Londres para que recibiera clases del pintor sir Peter Lely. Robert decidió, en principio, que no tenía mucho sentido gastar el dinero en un aprendizaje, ya que era consciente de que podía aprender por sí mismo a pintar, pero después comprobó que el olor de las pinturas le producía fuertes dolores de cabeza. En vez de convertirse en pintor, utilizó el dinero para pagarse una educación en la Westminster School, donde, además de realizar estudios académicos, aprendió a tocar el órgano.

Aunque era demasiado joven para verse involucrado directamente en la guerra civil, las repercusiones de este conflicto afectaron a Robert Hooke. En 1653, se aseguró una plaza como director del coro del Christ Church College de Oxford, pero

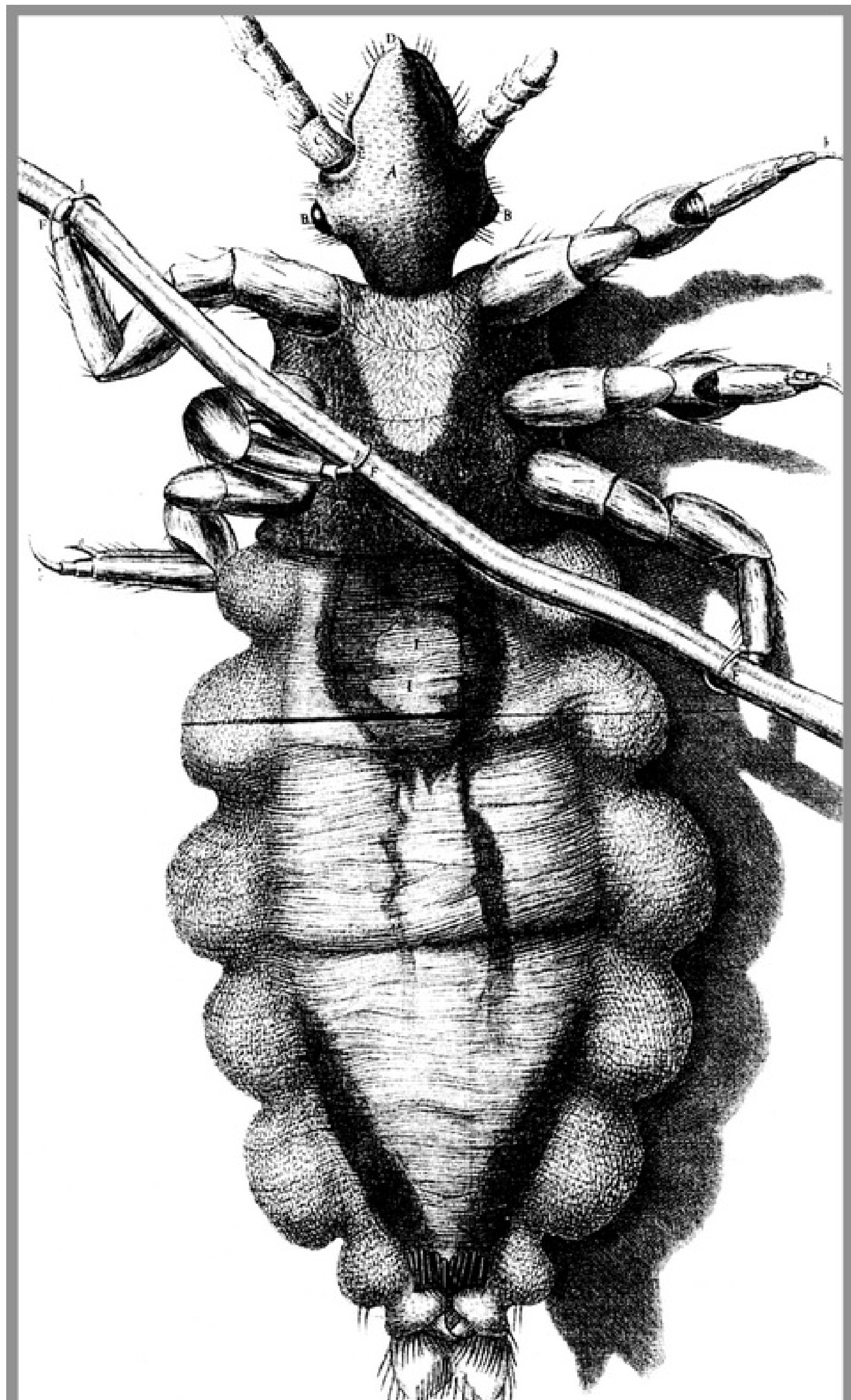
dado que el Parlamento, de tendencias puritanas, había suprimido frivolidades tales como los coros de las iglesias, resultó que en realidad lo que había conseguido era un modesto beneficio —una beca— a cambio de nada. Uno de sus contemporáneos en Oxford, un hombre que tenía un vivo interés por la ciencia, era Christopher Wren, tres años mayor que Hooke y asimismo un producto de la Westminster School. Como muchos otros estudiantes pobres de aquellos tiempos, Hooke consiguió equilibrar su presupuesto trabajando como criado de uno de los estudiantes más ricos. En aquella época, muchos de los miembros del grupo de Gresham College habían sido trasladados a Oxford por Oliver Cromwell para reemplazar a aquellos académicos a los que se consideraba contaminados por el apoyo que había prestado Oxford al bando realista durante la guerra, y la destreza de Hooke para fabricar cosas y realizar experimentos hizo que no tuviera precio como ayudante para este grupo de científicos. Pronto llegó a ser el principal ayudante (pagado) de Boyle y, además, su amigo para toda la vida. Hooke fue en gran medida responsable del éxito de la bomba de aire de Boyle y, por consiguiente, del éxito que tuvieron los experimentos realizados con esta bomba, además de estar plenamente implicado en los trabajos sobre química que Boyle llevó a cabo en Oxford. Sin embargo, Hooke realizó también trabajos de astronomía para Seth Ward, titular de la cátedra saviliana[*] de astronomía en aquel momento (que, entre otras cosas, mejoró con sus inventos la visión telescópica), y a mediados de la década de 1650 desarrolló procedimientos para perfeccionar la precisión de los relojes que se utilizaban para medir los tiempos en las observaciones astronómicas.

Cuando realizaba este trabajo, a Hooke se le ocurrió la idea de diseñar un nuevo tipo de reloj de bolsillo regulado por una espiral en el volante. Este reloj podría haber sido el precursor de un cronómetro que fuera suficientemente preciso y fiable

para determinar la longitud en el mar, y Hooke afirmó haber inventado el modo de lograr esto. Sin embargo, cuando negoció (sin revelar todos sus secretos) la posibilidad de patentar este artilugio, se rompieron las negociaciones porque Hooke se negó a aceptar una cláusula de la patente según la cual se permitía a otras personas llevarse los beneficios derivados de cualquier mejora de su diseño. Nunca reveló el secreto de su invento y se lo llevó consigo a la tumba. Pero el reloj de bolsillo, aunque no fuera un cronómetro que pudiera funcionar en el mar, constituyó una mejora significativa con respecto a los diseños existentes (Hooke regaló uno de estos relojes a Carlos II, que se mostró muy complacido) y hubiera bastado por sí solo para asegurarle un lugar en los libros de historia.

Cuando se constituyó en Londres la Royal Society a principios de la década de 1660, era preciso designar dos miembros permanentes, un secretario que se encargara de los aspectos administrativos y un gestor de los trabajos experimentales que organizara la actividad práctica. Por recomendación de Robert Boyle, se asignó al alemán de nacimiento Henry Oldenburg el primer puesto y a Robert Hooke el segundo. Oldenburg era de Bremen, donde había nacido en 1617, había estado en Londres en 1653 y 1654 como representante de dicha ciudad, donde conoció a Boyle y a otros miembros de su círculo, y fue durante algún tiempo tutor de uno de los sobrinos de Boyle, lord Dungarvan. Se avivó su interés por la ciencia y Oldenburg llegó a ser tutor en Oxford en 1656, implicándose activamente como miembro del círculo del que salieron los primeros miembros de la Royal Society. Manejaba con fluidez varias lenguas europeas y actuaba como una especie de agencia distribuidora de información científica, comunicándose por correspondencia con científicos de toda Europa. Se llevaba bien con Boyle y se convirtió en su agente literario, además de traducir sus libros,

pero desgraciadamente le cogió antipatía a Hooke. Falleció en 1677.


D
A
B
B

14. Un piojo. De la *Micrographia* de Hooke, 1664

Hooke abandonó Oxford para ocupar su puesto en la Royal Society en 1662; nunca terminó su licenciatura, debido a su trabajo como ayudante de Boyle y de otros, pero, de todas formas, en 1663 fue nombrado doctor en humanidades y también fue elegido miembro de la Royal Society. Dos años más tarde, su puesto de gestor de trabajos experimentales pasó de la categoría de empleado de la sociedad a una posición de socio y miembro del Consejo de la Royal Society, una distinción importante que marcó su reconocimiento como caballero, supuestamente en pie de igualdad con el resto de los socios, pero que no le libró (como ya veremos más adelante) de la carga de una enorme cantidad de responsabilidades y tareas.

Los honores estaban todos ellos muy bien, pero, dado que los recursos económicos de Hooke estaban agotados, el salario era igual de importante; desgraciadamente, la Royal Society estuvo en sus primeros tiempos afectada tanto por la desorganización, como por la escasez de recursos, con lo que, durante algún tiempo, Hooke se mantuvo a flote en el aspecto financiero exclusivamente gracias a la generosidad de Robert Boyle. En mayo de 1664, Hooke fue elegido candidato al puesto de profesor de geometría del Gresham College, pero lo perdió por el voto de calidad del alcalde. Después de muchas discusiones, resultó que el alcalde no tenía derecho a votar para el nombramiento, y en 1665 Hooke accedió al puesto, que conservó para el resto de su vida. Fue a principios de año cuando obtuvo finalmente el nombramiento, a los 29 años de edad, y también publicó su obra más importante, *Micrographia*. Estaba escrita en inglés, cosa que era inusual en aquella época, con un estilo muy claro y fácil de leer que garantizaba la accesibilidad para un amplio público lector, pero que pudo inducir a error a algunas personas que no llegaron a apreciar la destreza científica de Hooke, ya que el modo en que presentó su trabajo hacía que pareciera una cosa fácil.

Como sugiere su título, en *Micrographia* se trata en gran medida sobre microscopía (el primer libro sustancial sobre microscopía escrito por un científico importante), y no es exagerado decir que fue tan eficaz para abrir los ojos de la gente al mundo a pequeña escala, como lo fue el *Mensajero de las estrellas* de Galileo para despertar la atención de la gente con respecto al universo a gran escala. En palabras de Geoffrey Keynes, se puede clasificar «entre los libros más importantes que se han publicado en toda la historia de la ciencia». Samuel Pepys cuenta cómo se sentó a leer el libro hasta las dos de la madrugada, y se refería a él diciendo que era «el libro más ingenioso que he leído en toda mi vida».[2]

Hooke no fue el primer microscopista. En la década de 1660 eran ya unas cuantas las personas que habían seguido la línea marcada por Galileo y, como ya hemos visto, Malpighi, en particular, había realizado ya con el nuevo instrumento importantes descubrimientos, especialmente los concernientes a la circulación de la sangre. Sin embargo, la información relativa a las observaciones de Malpighi se había suministrado a la comunidad científica mediante informes separados de cada una de estas observaciones, más o menos a medida que se iban realizando. Lo mismo sucedió en gran medida con el contemporáneo de Hooke, Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723), un vendedor de paños holandés que, aunque no tenía una preparación académica formal, hizo una serie de descubrimientos asombrosos (que en su mayor parte comunicó a través de la Royal Society) utilizando microscopios que había construido él mismo. Estos instrumentos estaban formados por lentes convexas muy pequeña (algunas del tamaño de una cabeza de alfiler) montadas sobre tiras de metal y que se colocaban muy cerca del ojo —en realidad, se trataba sencillamente de unos anteojos de aumento increíblemente potentes, que a veces podían ampliar los objetos 200 o 300 veces—. El descubrimiento más importante de Van

Leeuwenhoek fue la existencia de unas criaturas diminutas dotadas de movimiento, que él reconoció como formas vivientes, y que se encontraban en pequeñas gotas de agua —microorganismos entre los que había ciertas variedades conocidas actualmente como protozoos, rotíferos y bacterias—. También descubrió los espermatozoos (a los que llamó *animalcules*), lo cual daba un primer indicio para averiguar cómo funciona la concepción, y, de manera independiente, duplicó parte del trabajo de Malpighi sobre los glóbulos rojos y los capilares, un trabajo del que no tenía conocimiento. Estos estudios fueron importantes, y la historia novelesca del papel desempeñado por Van Leeuwenhoek como un auténtico aficionado, al margen de la gran corriente principal de la ciencia, le ha asegurado un lugar prominente en los relatos populares sobre la ciencia en el siglo XVII (algunos de los cuales llegan incluso a atribuirle el invento del microscopio). Pero Van Leeuwenhoek estaba al margen de la corriente oficial y utilizaba técnicas e instrumentos no convencionales, mientras que Hooke representa la línea de la corriente principal a lo largo de la cual se desarrolló la microscopía, siguiendo su propio invento de microscopios compuestos perfeccionados que utilizaban dos o más lentes para ampliar los objetos que se estaba estudiando. También recopiló sus descubrimientos en un único y accesible volumen, en el que incluyó unos dibujos bellamente realizados y científicamente precisos en los que representaba lo que había visto con sus microscopios (fue su amigo Christopher Wren quien hizo muchos de aquellos dibujos). *Micrographia* marcó realmente el momento en que la microscopía llegó a su mayoría de edad como disciplina científica.

El más famoso entre los descubrimientos microscópicos que mencionó Hooke en su obra maestra fue el de la estructura «celular» de las láminas de corcho vistas mediante el microscopio. Aunque los poros que vio no eran células en el sentido que

la biología moderna da a este término, les dio dicho nombre y, cuando en el siglo XIX se llegó a identificar lo que actualmente llamamos células, los biólogos aplicaron el nombre que había utilizado Hooke. También describió la estructura de las plumas, las características esenciales de un ala de mariposa y el ojo compuesto de una mosca, entre otras muchas observaciones realizadas en el mundo de los seres vivos. En una de las partes del libro, identificó a los fósiles, de manera clarividente y correcta, como restos de criaturas y plantas que vivieron en otros tiempos. En aquella época estaba muy extendida la creencia de aquellas piedras que tenían el aspecto de seres vivos eran simplemente eso: rocas que, a través de algún proceso misterioso imitaban la apariencia de seres vivos. Pero Hooke, de una manera rotunda, acabó con la idea de que los fósiles eran «piedras formadas por algún *plastick virtue latent* dentro de la propia Tierra», y argumentó de manera convincente, refiriéndose a los objetos conocidos actualmente como amonitas, que eran «las conchas de ciertos moluscos, que por algún fenómeno de avalancha, inundación, terremoto, o algo por el estilo, habían sido llevadas a aquel lugar y se habían llenado de algún tipo de barro, arcilla, agua "petrificadora", u otra sustancia, que a lo largo del tiempo se había acumulado y endurecido». En las conferencias que dio por aquel entonces en el Gresham College, y que no se publicaron hasta después de su muerte, Hooke reconocía también expresamente que la fosilización llevaba implícitas también transformaciones importantes que se habrían producido en la superficie de la Tierra. «Zonas que han sido mar, son ahora tierra», dijo, y «algunas montañas se han convertido en llanuras y algunas llanuras en montañas, además de otros procesos similares».

El estudio de Hooke sobre la teoría ondulatoria de la luz

Cualquier cosa de éstas habría sido suficiente para hacer famoso a Hooke y complacer a lectores como Samuel Pepys. Pero en *Micrographia* había algo más que microscopía. Hooke estudió las características de las pautas del color producidas por finas capas de materiales (tales como los colores de las alas de un insecto o el arco iris que actualmente nos resulta tan familiar cuando se ha derramado fuel o petróleo en el agua) y sugirió que la causa era algún tipo de interferencia entre la luz reflejada por los dos lados de cada capa. Uno de los fenómenos que Hooke investigó de esta manera se refería a los anillos de luz de colores que se producen cuando dos trozos de vidrio se unen formando un pequeño ángulo; la forma clásica de este experimento consiste en colocar una lente convexa sobre un trozo plano de vidrio, de tal forma que quede un pequeño espacio en forma de cuña entre las dos superficies de cristal cerca del punto donde están en contacto. Los anillos de colores se ven mirando las lentes desde arriba hacia abajo, y el fenómeno está relacionado con el modo en que una fina capa de fuel extendida sobre el agua produce una pauta de colores que forman remolinos. Un indicio del éxito que tuvo Newton al reescribir la historia es el hecho de que este fenómeno se conozca como «anillos de Newton».

Las teorías de Hooke sobre la luz estaban basadas en una teoría ondulatoria que desarrolló posteriormente para incluir en ella la idea de que las ondas podrían ser una oscilación transversal (de lado a lado), no las ondas de compresión del tipo de empujar y tirar que previo Huygens. Hooke describió experimentos en los que se producía una combustión, a partir de los cuales llegó a la conclusión de que tanto en el proceso de quemar algo, como también la respiración, se absorbía algo que existía en el aire, con lo que estuvo muy cerca de descubrir el oxígeno (un siglo antes de que se descubriera realmente), y estableció una diferencia clara entre el calor, del que dijo que sur-

gía en un cuerpo debido «al movimiento o la agitación de sus partes» (adelantándose casi dos siglos a lo que luego se sabría al respecto), y la combustión, en la que dos cosas habrían de combinarse. Hooke experimentó con su propio cuerpo, sentándose en una habitación de la cual se extrajo el aire hasta que sintió dolor en sus oídos, y participó en el diseño y las pruebas de una forma primitiva de campana de buzo.

Inventó el barómetro con «esfera de reloj», que nos resulta tan familiar actualmente, y asimismo un anemómetro, un termómetro perfeccionado, y un higroscopio para medir la humedad del aire, llegando así a convertirse en el primer meteorólogo científico, y observó además la relación entre los cambios en la presión atmosférica y los cambios en el tiempo. Como propina, Hooke rellenó un espacio que quedaba al final del libro con dibujos basados en algunas de sus observaciones astronómicas. Además, detalló con una claridad cristalina la filosofía que subyacía a toda su obra: el valor de «una mano sincera y una mirada precisa y fidedigna para examinar y anotar las cosas tal como aparecen», en vez de confiar en «lo que es obra de la mente y la imaginación» sin ningún experimento u observación en que basarse. «La verdad es», escribió Hooke, «que la ciencia de la naturaleza se ha estado haciendo durante demasiado tiempo sólo como obra de la mente y la fantasía: ya es hora de volver a la sencillez y la sensatez de las observaciones de cosas materiales y obvias».

John Aubrey, que conoció a Hooke, lo describía en 1680 de la siguiente manera:

> De estatura mediana, algo encorvado, cara pálida y pequeña por la parte inferior, pero su cabeza es ancha; sus ojos son llenos y saltones, y no son vivaces; unos ojos grises. Tiene una cabellera delicada, de color castaño y con unos excelentes rizos húmedos. Es y siempre fue muy sobrio, y moderado en su dieta, etc.
>
> Del mismo modo que su cabeza es de una inventiva prodigiosa, también es él una persona de gran virtud y bondad.

Varios factores se confabularon para impedir a Hooke que siguiera avanzando en los logros que describió en *Micrographia* en la medida en que podría haberlo hecho. El primero fue su posición en la Royal Society, donde mantenía la actividad de la misma realizando experimentos (plural) en cada una de las reuniones semanales, algunos a petición de otros miembros, y otros de diseño propio. También leía públicamente ponencias remitidas por miembros que no estaban presentes, y asimismo describía nuevos inventos. En las actas de los primeros años de la Royal Society, una página tras otra, todas contienen expresiones del tipo «el señor Hooke realizó…», «al señor Hooke se le encargó…», «el señor Hooke observó…», «el señor Hooke hizo algunos experimentos…», y así una y otra vez. Como si esto no fuera ración suficiente (recordemos que Hooke, además, daba cursos completos de clases magistrales en el Gresham College), cuando Oldenburg falleció en 1677, Hooke le sustituyó, pasando a ser uno de los secretarios de la Royal Society (aunque por aquella época, al menos, había más de un secretario para compartir las pesadas tareas administrativas), pero renunció al puesto en 1683.

A corto plazo, poco después de la publicación de *Micrographia*, la peste interrumpió las actividades de la Royal Society y, como otros muchos, Hooke se marchó de Londres para ir a vivir al campo, donde se refugió como invitado en la casa del conde de Berkeley en Epsom. A medio plazo, otra cosa que distrajo a Hooke de su trabajo científico durante los años que siguieron al incendio de Londres en 1666, fue el hecho de que se convirtió en una de las principales personalidades (por detrás sólo de Christopher Wren) que participaron en la reconstrucción de la ciudad; muchos de los edificios atribuidos a Wren fueron construidos, al menos parcialmente, según los diseños de Hooke y, en la mayoría de los casos, es imposible distinguir entre las contribuciones de unos y otros.

El incendio se produjo en septiembre de 1666. En mayo de aquel año, Hooke había leído en la Royal Society una ponencia en la que explicaba el movimiento de los planetas alrededor del Sol basándose en una fuerza de atracción ejercida desde este astro para mantener a los planetas en sus órbitas (en vez de recurrir a los remolinos o vórtices cartesianos en el éter), de manera similar a una pelota que una persona puede mantener «en órbita» alrededor de su cabeza, si dicha pelota está atada a una cuerda y, sujetándola por la cuerda, esa persona la hace girar, ejerciendo así una fuerza sobre la pelota a través de la cuerda. Este fue el tema al que Hooke volvió después de su trabajo arquitectónico y de supervisión para la reconstrucción de Londres. En una conferencia pronunciada en 1674 describió este «sistema del mundo» de la forma siguiente:

> En primer lugar, todos los cuerpos celestes de cualquier tipo tienen un poder de atracción o de gravitación hacia sus propios centros, por el cual atraen no sólo sus propias partes, e impiden que se separen de ellos… sino que también atraen a todos los demás cuerpos celestes que están dentro de su esfera de actividad… La segunda suposición es que todos los cuerpos de cualquier tipo que inician un movimiento directo y simple continuarán moviéndose hacia adelante en línea recta, hasta que sean desviados por otros poderes efectivos y se tuerzan describiendo un movimiento circular, elíptico, o siguiendo alguna otra línea curva más compleja. La tercera suposición es que estos poderes de atracción son tanto más potentes operando, cuanto más cerca esté de sus propios centros aquel cuerpo sobre el que están actuando.[3]

La segunda de las «suposiciones» o hipótesis de Hooke es esencialmente lo que ahora se conoce como primera ley del movimiento de Newton; la tercera hipótesis sugiere erróneamente que la gravedad disminuye a medida que aumenta la distancia al objeto, no a medida que aumenta el cuadrado de la distancia, pero el propio Hooke no tardaría en rectificar esa equivocación.

Se acerca el momento de presentar a Halley y Newton, y de mencionar sus contribuciones al debate sobre la gravedad. Sin

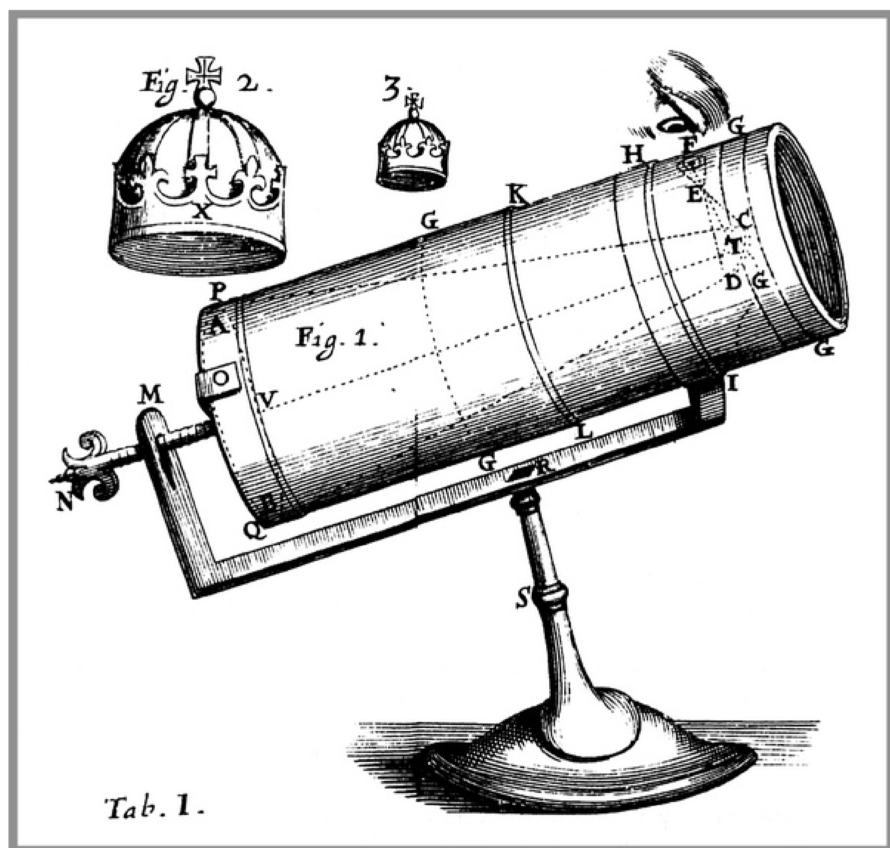
embargo, vamos a hacer primero un recorrido rápido por el resto de la vida de Hooke.

La ley de la elasticidad de Hooke

Sobre la última parte de la vida de Hooke sabemos gran cantidad de cosas gracias a un diario que comenzó a escribir en 1672. No se trata de una obra literaria, como el diario de Pepys, sino más bien de anotaciones telegráficas sobre hechos del día a día. Sin embargo, relata casi todo sobre la vida privada de Hooke en sus aposentos del Gresham College, con tanto candor que se pensó durante mucho tiempo que el diario no era adecuado para hacer una publicación, hasta el siglo XX (ésta sería una de las razones por las que la personalidad y los logros de Hooke no habían recibido un reconocimiento pleno hasta hace poco). Aunque nunca se casó, Hooke tuvo relaciones sexuales con varias de sus sirvientas, y hacia 1676, su sobrina Grace, que probablemente tenía 15 años entonces y había vivido con él desde que era una niña, se convirtió en su amante. Quedó destrozado cuando Grace murió, en 1687, y durante el resto de su vida sufrió una melancolía manifiesta; 1687 fue también un año clave en cuanto a la disputa con Newton, lo cual seguramente no contribuyó a mejorar su estado de ánimo. En el aspecto científico, aparte de sus trabajos sobre la gravedad, Hooke realizó en 1678 su trabajo más conocido: el descubrimiento de la ley de la elasticidad, que lleva su nombre. Es típico del modo en que la historia ha tratado a Hooke que este trabajo más bien insulso (un muelle estirado resiste con una fuerza proporcional a su extensión) se conociera como ley de Hooke, mientras que muchos de sus logros más brillantes (que no he mencionado aquí en su totalidad) se han olvidado o se han atribuido a otros. Hooke falleció el 3 de marzo de 1703 y a su funeral asistieron todos los miembros de la Royal Society

que estaban presentes en Londres en aquel momento. Al año siguiente, Isaac Newton publicó su trabajo épico sobre la luz y el color, titulado *Opticks,* tras haber retrasado su edición deliberadamente durante treinta años, esperando a que Hooke muriera.

La hostilidad de Newton contra Hooke (yo lo llamaría «hostilidad monomaníaca», pero sintió lo mismo también contra otras personas) se remontaba a principios de la década de 1670, cuando era un joven profesor en Cambridge y la Royal Society se fijó en él por primera vez. En la década de 1660, Newton (que era siete años más joven que Hooke) terminó en Cambridge sus estudios previos a la graduación, llegó a ser primero miembro del Trinity College y, en 1669, catedrático *lucasiano*[*] de matemáticas. Sucedió en esta cátedra a Isaac Barrow, el primer titular de una cátedra *lucasiana,* que dimitió, según dijo, para dedicar más tiempo a los estudios religiosos, pero no tardó en llegar a ser capellán real y luego director del Trinity College, por lo que, a la hora de dimitir, pudo haber tenido algún otro motivo oculto. Durante todo este tiempo, Newton había estado realizando experimentos y reflexionando sobre el mundo más o menos por su cuenta, sin discutir sus teorías prácticamente con nadie. Entre otras cosas, estudió la naturaleza de la luz, utilizando prismas y lentes. En el trabajo más importante que hizo sobre óptica, descompuso la luz blanca (en realidad luz solar) en los colores del espectro del arco iris utilizando un prisma, para luego recombinar los colores y conseguir de nuevo luz blanca, demostrando así que la luz blanca era precisamente una mezcla de todos los colores del arco iris.



15. El telescopio de Newton.
Philosophical Transactions of the Royal Society. 1672.

Previamente, otras personas (entre ellas Hooke) habían hecho que la luz blanca pasara por un prisma y habían proyectado el haz sobre una pantalla situada a unos pocos centímetros de distancia, produciendo una mancha blanca de luz con bordes coloreados. Newton pudo ir más allá porque utilizó como fuente de luz un agujero hecho con un alfiler en la persiana que cerraba una ventana y proyectó el haz que salía del prisma en una pared situada en el otro extremo de una habitación grande, a varios metros de distancia, proporcionando así un recorrido mayor para que los colores se separaran. A partir de este trabajo, su interés por los colores le llevó a plantearse el problema de

las franjas coloreadas que se producían en los bordes de las imágenes vistas mediante los telescopios construidos con lentes, llegando a diseñar y construir un telescopio de reflexión (sin conocer los trabajos anteriores de Leonard Digges) en el que no se presentaba este problema.

Empezaron a difundirse noticias relativas a todo esto cuando Newton explicó parte del trabajo realizado sobre la luz en las clases magistrales que dio como catedrático *lucasiano,* y a través de personas que habían visitado Cambridge y vieron el telescopio u oyeron hablar de él. La Royal Society solicitó ver el instrumento y, a finales de 1671, Isaac Barrow llevó uno a Londres (probablemente Newton fabricó dos) e hizo una demostración con él en el Gresham College. Inmediatamente, Newton fue elegido miembro de la Royal Society (la ceremonia tuvo lugar el 11 de enero de 1672) y se le preguntó si tenía algo más en reserva. Su respuesta consistió en presentar ante la Royal Society una extensa ponencia sobre la luz y los colores. El hecho era que Newton estaba a favor de la teoría corpuscular de la luz, ya que la concebía como una corriente de partículas, pero los descubrimientos que presentó en aquel momento eran válidos tanto si se utilizaba este modelo, como si se utilizaba el modelo ondulatorio (a favor del cual estaban, por ejemplo, Huygens y Hooke) para explicarlos.

Partiendo de varios comentarios marginales que aparecían en su ponencia, por ejemplo, la afirmación de que Newton comenzó sus experimentos ópticos en 1666, parece claro que la motivación para su interés por la luz había sido la lectura de la *Micrographia* de Hooke, pero intentó minimizar este hecho haciendo referencia a «un experimento inesperado, que el señor Hooke, en algún lugar de *Micrographia,* decía haber realizado con dos vasijas transparentes en forma de cuña», en vez de entrar en los detalles de la obra de Hooke (en este ejemplo relativo a lo que se conoce como anillos de Newton).

Hooke, un científico mayor que Newton y con una sólida reputación, se sintió verdaderamente ofendido al recibir del joven mequetrefe menos crédito que el que pensaba que se le debía, y así se lo dijo claramente a sus amigos. Hooke siempre fue muy susceptible con el tema de recibir el reconocimiento merecido por su trabajo, lo cual es comprensible si se tiene en cuenta su origen humilde y su pasado reciente como criado del caballero ilustrado que fundó la Royal Society.[4] Sin embargo, Newton, a pesar de su temprana edad, tenía la más alta opinión de sus propias capacidades (en gran medida justificada, pero dichas capacidades no eran todavía una característica muy llamativa) y consideraba a los demás científicos, independientemente de lo respetables y reconocidos que fueran, como unos seres que apenas valían para lamerle las botas. Esta actitud se fue reforzando durante los años siguientes, cuando una serie de críticos, claramente inferiores a Newton en el plano intelectual, plantearon una cantidad enorme de objeciones a su obra, lo cual demostraba, más que otra cosa, la ignorancia de estos individuos. Al principio, Newton intentó responder a algunas de las críticas más razonables, pero acabó enfureciéndose por el tiempo que le hacían perder, y en una carta a Oldenburg decía lo siguiente: «Veo que yo mismo me he convertido en un esclavo de la filosofía… Estoy decidido a despedirme de ella para siempre, excepto en lo que haga para mi satisfacción personal, o a dejarla atrás; porque creo que un hombre debe, o bien decidirse por no producir cosas nuevas, o convertirse en un esclavo para defenderlas».

Cuando Oldenburg, con enorme malicia, le hizo a Newton un informe exagerado sobre los puntos de vista de Hooke, intentando deliberadamente que surgieran problemas, la faena le salió mejor de lo que podía haber esperado. Newton respondió, dando las gracias a Oldenburg «por su franqueza al poner en mi conocimiento las insinuaciones del señor Hooke» y pidien-

do una oportunidad para poner las cosas en su sitio. J. G. Crowther ha descrito claramente la raíz real del conflicto, que Oldenburg había atizado hasta que se vieron las llamas: «Hooke no era capaz de entender qué tenía que ver el tacto con la ciencia… Newton consideraba los descubrimientos como una propiedad privada».[5] Al menos, era así cuando se trataba de los suyos. Tras cuatro años de lavar en público los trapos sucios relativos a este choque de caracteres, esta situación debía terminar o la Royal Society se convertiría en el hazmerreír de todo el mundo, y varios miembros se pusieron de acuerdo para insistir, a través de Oldenburg (al que debió de dar pena que llegara a su fin la diversión de que estaba disfrutando a expensas de Hooke), en una reconciliación pública (independientemente de lo que ambos protagonistas pensaran en privado), cosa que se logró mediante un intercambio de cartas.

La carta que Hooke escribió a Newton parece llevar el auténtico sello de su personalidad, es decir, su disposición permanente para debatir temas científicos de una manera amistosa (preferiblemente entre unos pocos colegas en alguno de los cafés de moda) y centrando su interés exclusivamente en desentrañar la verdad:

> Considero que en este asunto [el estudio de la luz] ha llegado usted más lejos que yo… Creo que el tema no podría ser investigado por una persona más adecuada y capaz que usted, que está capacitado en todos los sentidos para completar, rectificar y reformar lo que fueron las ideas derivadas de mis primeros estudios, que yo me proponía haber realizado por mí mismo, si lo hubieran permitido los otros cometidos agobiantes que me fueron asignados, aunque soy bastante consciente de que lo hubiera hecho con unas capacidades muy inferiores a las de usted. Su propósito y el mío se centran, supongo, en el mismo objetivo, que es el descubrimiento de la verdad, y creo que ambos somos capaces de oír objeciones, siempre que no nos lleguen en forma de hostilidad declarada, y tenemos los dos unas mentes igualmente inclinadas a realizar las deducciones más claras, razonando a partir de los experimentos.

Aquí habla un auténtico científico. La respuesta de Newton, aunque se podía interpretar como conciliatoria, estaba total-

mente fuera de lugar, y lleva un subtexto que vale la pena destacar. Después de decir «es usted demasiado generoso al valorar mis capacidades» (una observación que Newton jamás habría hecho si no le hubieran obligado), continúa con uno de los pasajes más famosos (y seguramente más incomprendidos) de la ciencia, interpretado habitualmente como un reconocimiento humilde de lugar secundario que él ocupaba en la historia de la ciencia:

> Lo que Descartes hizo fue un paso importante. Usted ha añadido mucho de distintas maneras, especialmente al tomar en consideración filosófica los colores de unas láminas muy finas. Si yo he sido capaz de ver más allá, es porque me encontraba sentado sobre los hombros de unos Gigantes.

John Faulkner, del Lick Observatory de California, ha propuesto una interpretación de estos comentarios que hace caso omiso de la leyenda de Newton y encaja mejor con el carácter que siempre se le ha atribuido. La referencia a Descartes aparece ahí simplemente para poner a Hooke en su lugar, sugiriendo que la prioridad que Hooke reclamaba le correspondía en realidad a Descartes. La segunda frase, de tono protector, reconoce algo de mérito a Hooke (recordemos que éste era un científico de más edad y con una obra más consolidada). Pero la frase clave es la que habla de «estar sentado sobre los hombros de unos Gigantes». Obsérvese que utiliza una mayúscula. Aun teniendo en cuenta los caprichos de la ortografía del siglo XVII, ¿por qué elegiría Newton poner el énfasis en esta palabra? Seguramente porque Hooke era un hombrecillo con la espalda deformada. El mensaje que Newton intenta transmitir es que, aunque pudiera haber tomado préstamos de los antiguos, no necesitaba robar las ideas de un hombrecillo como Hooke, añadiendo implícitamente que Hooke, además de ser un hombre físicamente pequeño, era un pigmeo mental. El hecho de que la fuente de esta expresión fuera anterior a Newton y que la utilizara para sus propios fines, no hace sino reforzar el argumento irrebatible de

Faulkner. Newton era un grosero (por razones que aclararemos en breve) y siempre albergaba rencores. Fiel a la palabra que había dado a Oldenburg, se encerró en su concha y, prácticamente, dejó de informar sobre sus teorías científicas después de este intercambio de cartas de 1676. Sólo volvió a aparecer propiamente en el escenario científico para publicar el libro más influyente de toda la historia de la ciencia, después de engatusar un poco a Edmond Halley, el tercer miembro del triunvirato que había transformado la ciencia en aquella época.

John Flamsteed y Edmond Halley: catalogación de las estrellas utilizando el telescopio

Halley, el más joven de los tres, había nacido el 29 de octubre de 1656 (esta fecha está tomada según el antiguo calendario juliano, que todavía estaba vigente en la Inglaterra de entonces; corresponde al 8 de noviembre en el moderno calendario gregoriano), durante el interregno parlamentario. Su padre, que se llamaba también Edmond, fue un próspero hombre de negocios y terrateniente, que se casó con Anne Robinson, la madre del científico Halley, en una ceremonia celebrada en la iglesia sólo siete semanas antes del nacimiento de éste. La explicación más probable para esta circunstancia es que habría tenido lugar antes una ceremonia civil, de la cual no se ha conservado ningún registro, y que la inminente llegada de su primer hijo animó a la pareja a casarse también por la Iglesia; era una práctica muy común en aquella época realizar primero una ceremonia civil y dejar para más tarde la ceremonia religiosa (si es que ésta llegaba a celebrarse). Edmond tuvo una hermana, Katherine, que nació en 1658 y murió siendo aún una niña, y un hermano, Humphrey, cuya fecha de nacimiento no es conocida, pero que falleció en 1684. Poco se sabe sobre los pormenores de los primeros años de la vida de Halley, salvo que, a pesar de ciertos

reveses económicos producidos por el incendio de Londres en 1666, su padre tenía medios suficientes para proporcionar al joven Edmond la mejor educación que se pudiera conseguir en aquella época, primero en la St. Paul's School de Londres (el hogar familiar estaba en un tranquilo pueblo situado cerca de Londres, en lo que actualmente es el barrio de Hackney) y posteriormente en la Universidad de Oxford. Cuando Halley llegó al King's College, en julio de 1673, el joven era ya un hábil astrónomo que había desarrollado su habilidad para la observación utilizando instrumentos que le pagaba su padre; llegó a Oxford con un conjunto de instrumentos entre los cuales figuraba un telescopio de 24 pies de longitud (alrededor de 7,3 metros) y un sextante de 2 pies (60 centímetros) de diámetro, un equipo de tanta calidad como los que utilizaban muchos de los astrónomos profesionales de aquel tiempo.

Por aquel entonces se produjeron varios acontecimientos que llegarían a tener un gran impacto en la vida futura de Halley. En primer lugar, su madre había muerto en 1672. No se conocen los detalles, pero se sabe que fue enterrada el 24 de octubre de aquel año. Las repercusiones le llegarían a Halley más tarde, como resultado del segundo matrimonio de su padre. Posteriormente, en 1674, la Royal Society decidió que se tenía que construir un observatorio como el de París, que acababa de ser fundado por la Academia francesa. La urgencia de hacer realidad esta propuesta se agudizó cuando los franceses afirmaron que el problema de determinar la longitud en el mar se había resuelto utilizando la posición de la Luna con respecto a un fondo de estrellas, como una especie de reloj para medir el tiempo en el mar. Esta afirmación resultó prematura: aunque esta idea, en principio, tendría que funcionar, la órbita de la Luna es tan complicada que, para cuando se recopilaron las tablas necesarias relativas a su movimiento, unos cronómetros de precisión habían proporcionado ya la solución del problema de

la longitud. Se pidió al astrónomo John Flamsteed (que vivió entre 1646 y 1719) que examinara el problema, y éste llegó a la conclusión acertada de que el procedimiento planteado por los franceses no funcionaría, porque no se conocía con la exactitud necesaria la posición de la Luna, ni las posiciones de las estrellas de referencia. Cuando Carlos II se enteró del asunto, decidió que, como nación de navegantes, Gran Bretaña tenía que disponer de la información necesaria para ayudar a la navegación, y el observatorio que se había planificado pasó a ser un proyecto de la Corona. Flamsteed fue nombrado «observador astronómico» (el primer astrónomo real) a través de una orden del rey emitida el 4 de marzo de 1675 y el Observatorio Real fue construido para que él trabajara allí, en Greenwich Hill (un emplazamiento elegido por Wren). Flamsteed se trasladó a residir allí en julio de 1676 y fue elegido miembro de la Royal Society aquel mismo año.

En 1675, Edmond Halley, un estudiante que se preparaba para su licenciatura, inició una correspondencia con Flamsteed, escribiéndole al principio para explicarle algunas de sus propias observaciones, que estaban en desacuerdo con algunas de las tablas de datos astronómicos que se había publicado, indicando que dichas tablas eran inexactas, y pidiendo a Flamsteed que, si podía, confirmara los resultados de Halley. Esto sonó como música en los oídos de Flamsteed, ya que le confirmaba que las técnicas de observación modernas podían perfeccionar los catálogos estelares existentes. Ambos se hicieron amigos y, durante cierto tiempo, Halley fue algo así como el protegido de Flamsteed —aunque, como ya veremos, posteriormente riñeron—. Durante el verano de aquel año, Halley visitó a Flamsteed en Londres y le ayudó en algunas observaciones, incluidos dos eclipses de Luna que se produjeron el 27 de junio y el 21 de diciembre, respectivamente. Después de la primera de estas observaciones, Flamsteed escribió en la *Philosophical Transactions*

de la Royal Society que «Edmond Halley, un joven de Oxford dotado de gran talento, estuvo presente en dichas observaciones y había ayudado minuciosamente en muchas de ellas». Halley publicó tres informes científicos en 1676, uno sobre órbitas planetarias, otro sobre la ocultación de Marte por la Luna observada el 21 de agosto de aquel año, y el tercero sobre una gran mancha solar detectada durante el verano de 1676.[6] Estaba claro que Halley era una estrella ascendente dentro de la astronomía. Pero ¿dónde podía él contribuir mejor al desarrollo de esta ciencia?

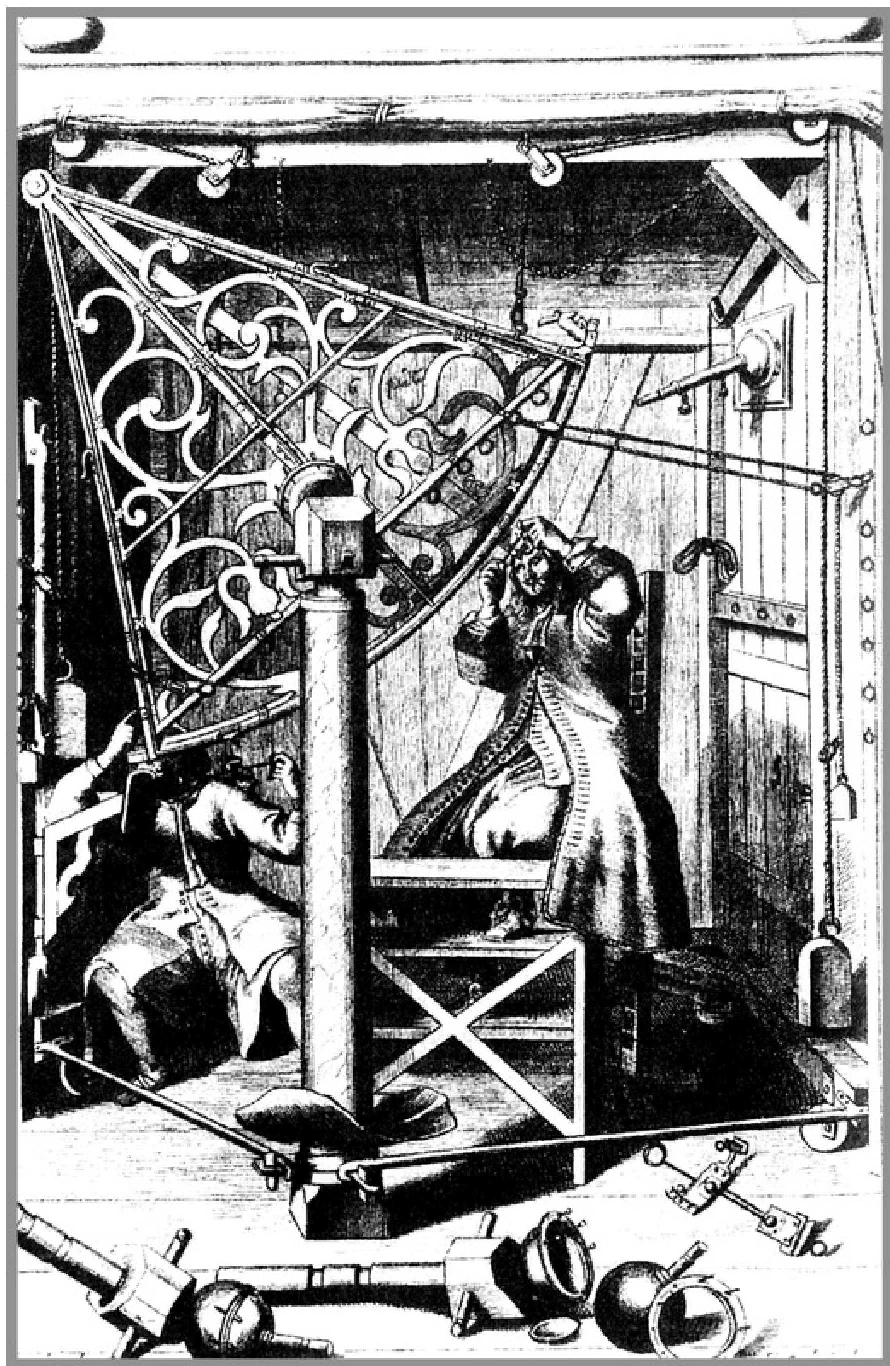
La tarea primordial que Flamsteed tenía que realizar en el nuevo Observatorio Real era una exploración precisa de los cielos del hemisferio boreal, utilizando alzas telescópicas modernas para mejorar la exactitud de los viejos catálogos que se basaban en el llamado sistema de alzada abierta (el sistema que utilizó Tycho Brahe), en el que el observador miraba a lo largo de una varilla que apuntaba a la estrella observada. Con los aparatos telescópicos, un fino pelo situado en el plano focal del telescopio proporciona una guía mucho más precisa para conseguir el necesario alineamiento de la estrella. Impaciente por hacerse un nombre y desarrollar una trayectoria propia, a Halley se le ocurrió la idea de hacer algo similar a la exploración de Flamsteed, pero en los cielos del hemisferio austral y concentrándose sólo en el par de estrellas más brillantes entre un ciento de ellas, para conseguir resultados de un modo razonablemente rápido. Su padre apoyó esta idea, ofreciendo a Halley una asignación de 300 libras esterlinas al año (tres veces el salario de Flamsteed como astrónomo real), y prometiendo cubrir muchos de los gastos de la expedición. Flamsteed y sir Jonas Moore, el responsable del servicio oficial de topografía y cartografía, recomendaron esta propuesta al rey, quien arregló un pasaje gratuito con la Compañía de la Indias Orientales para que Halley, sus instrumentos y un amigo, James Clerke, se des-

plazaran a la isla de Santa Helena, que en aquel tiempo era la posesión británica situada más al sur (esto sucedía casi cien años antes de que James Cook desembarcara en Botany Bay en 1770). Partieron en noviembre de 1676 y Halley, que acababa de cumplir veinte años, abandonó sus estudios de licenciatura.

Esta expedición constituyó un enorme éxito científico (a pesar del mal tiempo que Halley y Clerke encontraron en Santa Helena) y parece ser que, además, dio a Halley la oportunidad de hacer un poco de vida social. Hay indicios de comportamiento sexual indecoroso que rodean la primera etapa de la vida adulta de Halley. En su obra Brief Lives, John Aubrey menciona a un matrimonio que llevaba muchos años casado, pero no tenía hijos, y viajaba a Santa Helena en el mismo barco que Halley: «Antes de regresar de la isla», escribe Aubrey, «esta dama dio a luz un niño». Halley parece haber mencionado este hecho, explicándolo como debido a lo bien que le sentó el viaje o el aire de Santa Helena a esta pareja sin hijos, pero Aubrey da a entender que Halley era el padre de aquel niño. Rumores de este tipo perseguirían al joven durante varios años.

Halley regresó en la primavera de 1678, y su catálogo de estrellas australes se publicó en noviembre de aquel año, con lo que se ganó el apodo de «nuestro Tycho del sur», con el que le bautizó el propio Flamsteed; fue elegido miembro de la Royal Society el 30 de noviembre. Además de realizar su trabajo de catalogar estrellas, mientras estuvo en Santa Helena, Halley observó el paso de Mercurio a través de la cara visible del Sol. En principio, esta observación proporcionó un modo de calcular la distancia al Sol utilizando una variante del tema de la paralaje, pero estas primeras observaciones no fueron suficientemente precisas para que el resultado fuera definitivo. No obstante, Halley había puesto así una semilla que no tardaría mucho en dar fruto. El 3 de diciembre, atendiendo a una «recomendación» del rey, se le concedió a Halley su doctorado en humani-

dades («después» de haberse convertido en miembro de la Royal Society), a pesar de que no cumplía los requisitos formales para la obtención de este título. Así se convirtió en miembro, en pie de igualdad, del grupo en que estaban Boyle, Hooke, Flamsteed, Wren y Pepys (para entonces Newton se había retirado, para meterse dentro de su concha en Cambridge), y resultó que estos señores tenían para él un empleo que le iba como anillo al dedo.



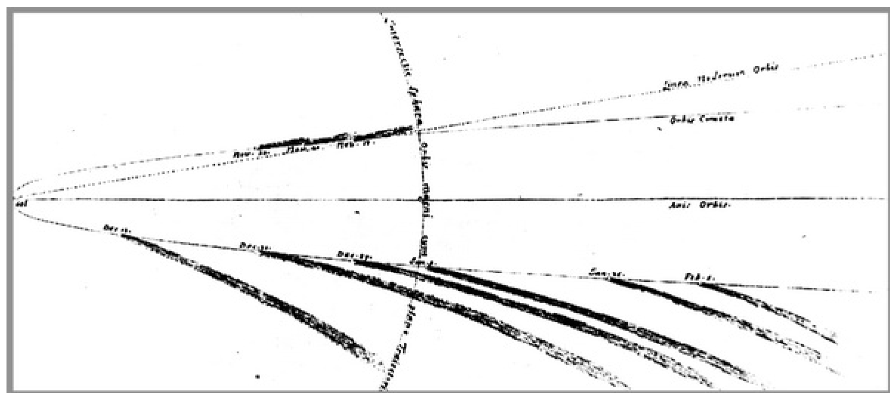
16. Hevelius calcula las posiciones de las estrellas utilizando un sextante. De *Machina Coelestis*, de Hevelius, 1673.

Dada su importancia potencial para la navegación, la cuestión de obtener las posiciones exactas de las estrellas era de vital importancia a finales del siglo XVII, tanto por sus implicaciones comerciales como militares. Sin embargo, el programa principal de observación de la década de 1670, un intento de mejorar el catálogo de Tycho Brahe, se llevó a cabo en Danzig (actualmente Dansk) y lo hizo un astrónomo alemán que insistía en utilizar el tradicional sistema de alzada abierta del propio Tycho Brahe. Aunque actualizado en gran medida con instrumentos nuevos. Esto supuso una gran frustración para los demás astrónomos de la época, especialmente para Hooke y Flamsteed. Este astrónomo tan retrógrado había nacido en 1611, lo que quizás explica que utilizara procedimientos pasados de moda, y fue bautizado como Johann Höwelcke, pero latinizó su nombre, convirtiéndolo en Johannes Hevelius. En una correspondencia iniciada en 1668, Hooke le imploraba que cambiara al sistema de alzas telescópicas, pero Hevelius se negó obcecadamente, afirmando que podía hacerlo igual de bien con el sistema de alzada abierta. La verdad es que Hevelius estaba sencillamente demasiado apegado a sus métodos y desconfiaba de los procedimientos nuevos. Era como alguien que persiste en utilizar una vieja máquina de escribir manual, a pesar de tener a su alcance un ordenador moderno con un procesador de texto.

Una de las características fundamentales del catálogo austral de Halley (realizado, por supuesto, telescópicamente) era que incluía también zonas del ciclo que ya había estudiado Tycho Brahe, de tal modo que, al observar algunas de las estrellas que también había observado Tycho, Halley había podido comparar sus mediciones con las del cielo del hemisferio boreal, donde Hevelius se dedicaba entonces a mejorar (según su propia estimación) los datos de Tycho. Cuando Hevelius escribió a Flamsteed a finales de 1678 solicitando ver los datos de Halley, la Ro-

yal Society vio en esto una oportunidad de comprobar las afirmaciones de Hevelius. Halley envió a Hevelius una copia del catálogo austral y dijo que le encantaría utilizar los nuevos datos de Hevelius en vez de las posiciones estelares obtenidas por Tycho Brahe para enlazar las observaciones de los ciclos de los hemisferios boreal y austral. Además, por supuesto, también dijo que le gustaría visitar Danzig para confirmar la exactitud de las nuevas observaciones.

Consecuentemente, en la primavera de 1679, Halley emprendió el viaje para ver si las increíble afirmaciones que estaba haciendo Hevelius, que por entonces tenía 68 años de edad, sobre la exactitud de sus mediciones podían estar justificadas. Al principio, Halley apoyó las afirmaciones de Hevelius, remitiendo a Londres la noticia de que las posiciones que Hevelius había obtenido con el sistema de alzadas abiertas eran realmente tan buenas como el afirmaba. Pero, a su vuelta a Inglaterra, cambió finalmente de tono y dijo que las observaciones telescópicas eran mucho mejores. Halley afirmó más tarde que sencillamente había querido actuar con tacto delante de Hevelius, porque no quería acelerar la muerte de «un caballero testarudo de avanzada edad». De hecho, Hevelius vivió nueve años más, por lo que no podía estar tan delicado cuando Halley fue a verle. Sin embargo, ciertos cotillees de la época sugieren que en esta historia había algo más.



17. Dibujo, realizado por Newton, de la órbita de un cometa visto en 1680.

La primera esposa de Hevelius había fallecido en 1662 y el astrónomo se había casado de nuevo, en 1663, con una belleza de 16 años llamada Elisabetha. Cuando Halley visitó Danzig, Hevelius tenía 68 años y Elisabetha 32. Halley era un guapo joven de 22 años con numerosos antecedentes de indiscreción sexual. Puede que no hubiera nada detrás de los inevitables rumores que acompañaron a Halley cuando regresó a Gran Bretaña, y es posible que haya una explicación perfectamente respetable para el hecho de que, cuando aquel mismo año, posteriormente, llegó a Londres la falsa noticia de que Hevelius había muerto, la reacción inmediata de Halley fuera enviar como regalo a la supuesta viuda un vestido de seda muy caro (su precio, que fue de 6 libras 8 chelines y 4 peniques, equivalía al sueldo de tres semanas del astrónomo real, aunque sólo era una semana de la asignación de Halley). Sin embargo, el tipo de comportamiento que hacía creíbles aquellos rumores contribuyó a crear una fisura en las relaciones entre Flamsteed (un hombre muy serio) y Halley, al mismo tiempo que la aceptación inicial por parte de Halley de las afirmaciones poco realistas de Hevelius no obtuvieron ciertamente la aprobación de su mentor.

No parece que Halley se preocupara mucho en aquella época por el futuro de su carrera como astrónomo. Después de haber conseguido tanto en tan poco tiempo, como una estrella del pop tras la primera oleada de éxitos, parece ser que se conformó con sentarse en sus laureles y hacer la mayoría de las cosas apetecibles que podía costearse con su dinero (o, más bien, con el dinero de su padre). Tras regresar de Danzig, durante más de un año se limitó básicamente a divertirse, asistiendo a las reuniones de la Royal Society, pero sin contribuir con ningún trabajo, visitando Oxford y frecuentando las cafeterías de moda, el equivalente a los bares de copas que están hoy en día de moda (su preferida era la cafetería Jonathan en Change Alley). Sin embargo, hacia finales de esta época, los cometas irrumpieron en la vida de Halley por primera vez, aunque al principio sólo de un modo discreto.

Durante el invierno de 1680-1681, se hizo visible un brillante cometa. Fue visto por primera vez en noviembre de 1680, desplazándose hacia el Sol antes de perderse en la luz deslumbrante de este astro. Reapareció un poco más tarde, alejándose del Sol, y al principio se pensó que eran dos cometas diferentes. Flamsteed fue una de las primeras personas en sugerir que el fenómeno era realmente un solo objeto y formuló la hipótesis de que había sido repelido por el Sol mediante algún tipo de efecto magnético. Se trataba de un objeto que destacaba mucho en el cielo nocturno, claramente visible desde las calles de Londres y París, el cometa más brillante que habían visto los que vivían en aquella época. Cuando el cometa apareció por primera vez, Halley estaba a punto de embarcar acompañado por Robert Nelson, un antiguo amigo de sus tiempos de escolar, para hacer el típico Gran Tour de Europa que solían hacer entonces los caballeros jóvenes y ricos. Viajaron a París en diciembre, llegando allí la víspera de Navidad y vieron la segunda aparición del cometa desde el continente. Durante sus viajes a través

de Francia e Italia, Halley aprovechó la oportunidad para debatir sobre el cometa (y otras cuestiones astronómicas) con otros científicos, como, por ejemplo, Giovanni Cassini. Robert Nelson se quedó en Roma, donde se enamoró de la segunda hija del conde de Berkeley, el caballero que le había proporcionado refugio a Hooke cuando éste huyó de la peste. Posteriormente, Nelson se casó con esta muchacha. Halley regresó a Inglaterra pasando por Holanda y por París, desviándose quizá del Gran Tour habitual que hacían los diletantes, ya que, cuando llegó de vuelta a Londres el 24 de enero de 1682, había «hecho conocimiento y amistad», según las palabras de Aubrey, «con todos los matemáticos eminentes de Francia e Italia».

Halley sólo pasó algo más de un año en el extranjero, lo cual era poco para un Gran Tour de aquella época, y es posible que se apresurara a regresar a casa porque su padre se casó aproximadamente por aquellas fechas, aunque no conocemos la fecha exacta de la boda. Una muestra de lo poco que sabemos sobre la vida privada de Halley es que su propia boda, que tuvo lugar el 20 de abril de 1682, no aparece en ningún texto, cuando se trata de registros históricos. Sabemos que la esposa de Halley se llamaba Mary Tooke y que fue en Londres donde se celebró la boda, en la iglesia de Saint James, situada en Duke Place. La pareja convivió durante 50 años (al parecer felizmente) y tuvo tres hijos. El joven Edmond nació en 1698, fue cirujano de la marina de guerra y murió dos años antes que su padre. Hubo dos hijas que nacieron ambas el mismo año, en 1688, pero no fueron gemelas. Margaret permaneció soltera, pero Catherine se casó dos veces. Posiblemente hubo otros hijos que murieron de niños, y esto es en esencia todo lo que sabemos de la familia de Halley.

Después de contraer matrimonio, Halley vivió en Islington, y durante los dos años siguientes realizó observaciones minuciosas de la Luna con el objetivo de conseguir (por fin) los datos

de referencia que eran esenciales para calcular la longitud por el método lunar. Esto requeriría la realización de observaciones precisas durante unos 18 años, el tiempo que tarda la Luna en completar un ciclo en sus desplazamientos relativos a las estrellas. Pero, en 1684, los asuntos de Halley se vieron inmersos en una gran confusión debido al fallecimiento de su padre, y el proyecto quedó abandonado durante muchos años, ya que tuvieron preferencia otros temas.

El padre de Halley salió de su casa el miércoles 5 de marzo de 1684 y nunca regresó. Su cuerpo desnudo fue encontrado cinco días más tarde en un río cerca de Rochester. El veredicto oficial fue asesinato, pero no se encontró a ningún asesino, y las pruebas eran también coherentes con la posibilidad del suicidio. El padre de Halley falleció sin dejar testamento y con su fortuna considerablemente menguada por las extravagancias de su segunda esposa. Halley y su madrastra estuvieron envueltos en una costosa batalla legal por las propiedades. Ciertamente, Halley no se quedó hundido en la pobreza a causa de estos acontecimientos —tenía propiedades obtenidas por sí mismo y, además, su esposa había aportado al matrimonio una buena dote—. Sin embargo, las circunstancias se vieron suficientemente alteradas como para que, en enero de 1686, Halley renunciara a ser miembro de la Royal Society con el fin de poder ser un empleado a sueldo dentro de esta sociedad —las reglas de la misma establecían que los empleados a sueldo de la Royal Society no podían ser miembros de la misma—. Sólo la necesidad de dinero —aunque fuera una necesidad temporal— pudo haber motivado este tipo de actuación.

Al igual que la vida privada de Halley, el mundo europeo atravesaba también una época de turbulencias a mediados de la década de 1680. En Francia, el edicto de Nantes fue revocado en 1685, mientras que, un poco más lejos, las tropas turcas llegaban a las puertas de Viena, Buda y Belgrado aproximada-

mente en la misma época. En Inglaterra, Carlos II murió y le sucedió su hermano, el católico Jacobo II. Mientras se producían estos acontecimientos, Halley se vio implicado en lo que actualmente se considera la publicación más importante de la historia de la ciencia: los *Principia* de Isaac Newton.

Volviendo a enero de 1684, después de una reunión de la Royal Society, Halley inició una conversación con Christopher Wren y Robert Hooke sobre las órbitas de los planetas. La idea de la ley del cuadrado inverso [o ley de la gravitación universal de Newton] relativa a la atracción entre los cuerpos subyacía a la cuestión de las órbitas planetarias y no era algo nuevo ni siquiera entonces —se remontaba al menos a 1673, cuando Christiaan Huygens había calculado la fuerza centrífuga de un objeto que se desplazaba recorriendo una órbita circular, y Hooke había comenzado a especular siguiendo la misma línea de razonamiento, como veremos, en la correspondencia que sostuvo con Newton a partir de 1674—. Wren también había discutido sobre estas teorías con Newton en 1677. Los tres miembros de la Royal Society estaban de acuerdo en que las leyes del movimiento de Kepler implicaban que la fuerza centrífuga que «empujaba» a los planetas tendiendo a alejarlos del Sol debía ser inversamente proporcional a los cuadrados de sus distancias a este astro y que, por consiguiente, con el fin de que los planetas permanecieran en sus órbitas, tenían que ser atraídos por el Sol con una fuerza equivalente que contrarrestara totalmente a la fuerza centrífuga.

Pero ¿era esto una consecuencia inevitable de una ley del cuadrado inverso? ¿Era cierto que esta ley sólo requería que los planetas «tuvieran necesariamente» que seguir órbitas elípticas? Probar esto matemáticamente presentaba una dificultad enorme si sólo se podía utilizar las técnicas tradicionales de que disponían entonces, por lo que Halley y Wren estaban dispuestos a admitir que esta tarea iba más allá de sus capacidades.

Sin embargo, Hooke les dijo a los otros dos que podía deducir todas las leyes del movimiento planetario partiendo del supuesto de una ley del cuadrado inverso. Halley y Wren se mostraron escépticos, y éste le dijo a Hooke que le regalaría un libro por valor de 40 chelines si conseguía realizar la demostración en dos meses.

Hooke no consiguió hacer la demostración y el debate quedó interrumpido mientras Halley se dedicaba a resolver el complicado asunto de poner en orden los negocios de su padre después del asesinato (o suicidio) de éste. Probablemente tuvo relación con esto el viaje que hizo Halley a Peterborough durante el verano de 1684 para visitar a unos parientes y, a su vez, este viaje pudo ser la razón por la que visitó a Newton en Cambridge en agosto del mismo año —porque de hecho estaba por aquella zona—. No existen en absoluto pruebas de que se tratara de algún tipo de visita oficial por encargo de la Royal Society (a pesar de los mitos que se han creado al respecto) y sólo hay pruebas circunstanciales de que Halley hiciera esta visita porque se encontraba en aquella zona por negocios familiares. Lo que sí es cierto es que mantuvo correspondencia con Newton a propósito del corneta, y es posible que se encontrara con él en 1682, por lo que es natural pensar que hubiera aprovechado la oportunidad de visitar Cambridge cuando ésta se presentó. Fuera como fuese, no hay duda de que, cuando Halley visitó a Newton, debatieron sobre las órbitas de los planetas y la ley del cuadrado inverso. Posteriormente, Newton contó a su amigo, el matemático Abraham de Moivre (un refugiado hugonote francés) lo que sucedió exactamente:

> En 1684, el doctor Halley fue a visitarle a Cambridge y, cuando llevaban cierto tiempo reunidos, el doctor le preguntó qué tipo de curva creía él que describirían los planetas, suponiendo que la fuerza de atracción hacia el Sol fuera inversa al cuadrado de las distancias respectivas de los planetas a dicho astro. Sir Isaac respondió inmediatamente que sería una elipse, ante lo cual el doctor Halley, con alegría y asombro, le preguntó cómo lo sabía, a lo que Newton respondió que la ra-

> zón era que lo había calculado. Tras esto, el doctor Halley le pidió que le dejara ver los cálculos inmediatamente. Sir Isaac buscó entre sus papeles, pero no pudo encontrarlos, por lo que le prometió a Halley que los volvería a hacer y luego se los enviaría.[7]

Fue este encuentro lo que indujo a Newton a escribir los *Principia*, consolidando así su imagen como el científico más grande que ha existido jamás. Sin embargo, casi todo lo que explicó en este libro había sido realizado años atrás y se había mantenido oculto, sin darse a conocer, hasta que tuvo lugar el afortunado encuentro de Cambridge en 1684. Hoy en día puede resultar difícil comprender esto, ya que los científicos actuales suelen estar demasiado ansiosos por llevar sus teorías a la imprenta y dejar claro que han sido los primeros, pero, si observamos los antecedentes y la formación de Newton, su afición a los secretos resulta menos sorprendente.

La primera época de la vida de Newton

Por el lado paterno, Newton procedía de una familia de granjeros que habían empezado justo entonces a progresar materialmente, pero carecían de pretensiones en cuanto a conseguir progresos intelectuales. Su abuelo, Robert Newton, había nacido en alguna fecha en torno a 1570 y había heredado terrenos agrícolas en Woolsthorpe, Lincolnshire. Su actividad agropecuaria fue tan próspera que le permitió adquirir la casa señorial de Woolsthorpe en 1623, obteniendo así el título de lord. Aunque esto no era en aquellos tiempos tan impresionante como nos pueda parecer hoy en día, constituyó sin embargo claramente un paso hacia arriba en la escala social para la familia Newton, y es probable que fuera una factor importante para que Isaac, el hijo de Robert nacido en 1606, pudiera contraer matrimonio con Hannah Ayscough, la hija de James Ayscough, al que los documentos de la época califican de «caballero», Los

esponsales tuvieron lugar en 1639. Robert nombró a Isaac heredero de todas sus propiedades, incluido el título de lord, y Hannah aportó al matrimonio como dote una propiedad que le proporcionaba una renta de 50 libras anuales. Ni Robert Newton, ni su hijo Isaac aprendieron jamás a leer y escribir, pero el hermano de Hannah, William, era un licenciado por Cambridge, un clérigo que vivía en el pueblo vecino de Burton Coggles. El matrimonio de Isaac y Hannah se celebró en 1642, seis meses después de la muerte de Robert Newton; seis meses después de la boda, murió también Isaac, dejando a Hannah embarazada de un niño que nació el día de Navidad y fue bautizado con el nombre de Isaac, como su difunto padre.

Muchos relatos populares resaltan la coincidencia de que el famoso Isaac Newton naciera el mismo año en que murió Galileo, 1642. Pero esta coincidencia se basa en un equívoco, ya que se utilizan fechas de dos sistemas diferentes de calendario. Galileo falleció el 8 de enero de 1642 según el calendario gregoriano, que ya se había implantado en Italia y en otros países católicos; Isaac Newton nació el 25 de diciembre de 1642 según el calendario juliano, que todavía se utilizaba en Inglaterra y en otros países protestantes. En el calendario gregoriano, el que usamos actualmente, Newton nació el 4 de enero de 1643, mientras que en el calendario juliano Galileo murió justo a finales de 1641. De cualquier modo, ambos acontecimientos no se produjeron el mismo año. Pero existe una coincidencia auténtica, e igualmente notable, que resulta de tomar la fecha de nacimiento de Newton el 4 de enero de 1643, siguiendo nuestro calendario moderno. En este caso, se observa que nació exactamente 100 años después de la publicación de *De Revolutionibus*, lo que pone de manifiesto la rapidez con que la ciencia se consolidó una vez que llegó a formar parte del Renacimiento.

Aunque la guerra civil inglesa, como ya hemos visto, trastornó el desarrollo de las vidas de mucha gente, durante los años inmediatamente siguientes al nacimiento de Newton, en gran medida pasó de largo por el tranquilo remanso de Lincolnshire, y durante tres años Newton disfrutó de toda la dedicación de su madre viuda. Pero, en 1645, justo cuando Isaac tenía la edad suficiente para darse cuenta, su madre volvió a casarse y enviaron al niño a vivir con sus abuelos maternos. El verse literalmente arrancado de los brazos de su madre y expulsado a un entorno más austero a tan temprana edad, hizo que Isaac Newton quedara mentalmente marcado para el resto de su vida, aunque no hubiera intención cruel alguna en estos hechos. Hannah se limitó a actuar de una manera práctica.

Como la mayoría de los matrimonios entre familias de «caballeros» de la época, el segundo matrimonio de Hannah (al igual que el primero) tuvo más que ver con una transacción de tipo comercial, que con una cuestión amorosa. El segundo esposo de Hannah era un viudo de 63 años, Barnabas Smith, que necesita una nueva compañera y eligió a Hannah entre otras candidatas disponibles. Smith era el párroco anglicano de North Witham, localidad situada a menos de 3 kilómetros de Woolsthorpe. El lado comercial del acuerdo incluía la condición de que el párroco asignara un terreno al joven Isaac, a cambio de que éste viviera fuera del nuevo hogar del matrimonio. Así, mientras Hannah partía hacia North Witham, donde dio a luz dos hijas y un hijo antes de que Barnabas Smith muriera en 1653, Isaac pasó ocho años en los que se formó como un niño solitario al cuidado de sus ancianos abuelos, que se habían casado en 1609 y debían de ser casi de la misma edad que el nuevo marido de Hannah. Parece ser que los abuelos matemos de Newton fueron más bien cumplidores y estrictos, pero no especialmente cariñosos con él.

Resulta bastante obvio el lado negativo de todo esto y está claro que tuvo que influir en el desarrollo de Isaac, convirtiéndole en un individuo más bien solitario, que vivió apartado e hizo pocos amigos íntimos. Sin embargo, el lado positivo es que recibió una educación.[8] Si su padre hubiera vivido, seguramente Isaac Newton habría seguido sus pasos y se habría convertido en un granjero; pero, para los abuelos Ayscough resultaba natural enviar a su nieto a la escuela, aunque se pueda sospechar que una de las razones para esto fuera quitarse de en medio al niño. Aunque Isaac regresó a la casa de su madre en 1653, cuando tenía 10 años y ella se había quedado viuda por segunda vez, la semilla ya estaba puesta y, cuando el niño cumplió 12 años, fue enviado a estudiar a una escuela de enseñanza secundaria en Grantham, a unos 8 kilómetros de Woolsthorpe. Mientras estuvo allí, se alojó con la familia de un farmacéutico, el señor Clark, cuya esposa tenía un hermano que se llamaba Humphrey Babington. Humphrey Babington era miembro de la dirección del Trinity College, aunque pasaba la mayor parte del tiempo en Boothby Pagnall, cerca de Grantham, donde era párroco.

Aunque, según parece, Isaac Newton fue un chico solitario en la escuela, fue un buen estudiante y también demostró tener una habilidad extraordinaria haciendo maquetas (lo que nos recuerda la destreza de Hooke), y construyó artilugios (mucho más que simples juguetes) tales como la maqueta de un molino de viento que funcionaba, e hizo volar una cometa en la noche con un farolillo de papel atado a ella, provocando así una de las primeras alarmas por aparición de ovnis que se recuerdan. A pesar de la esmerada educación (mayormente los clásicos, el latín y el griego) que recibió Newton, su madre todavía esperaba que éste se hiciera cargo de la granja familiar cuando tuviera la edad precisa, por lo que en 1659 lo sacó de la escuela para aprender, mediante el trabajo práctico, cómo gestionar la tie-

rra. Este intento acabó en desastre. Debido a que se interesaba más por los libros, que solía llevar consigo para leer cuando salía al campo, y no tanto por el ganado, Newton fue multado varias veces por no impedir que sus animales ocasionaran daños en las cosechas de otros granjeros, y nos han llegado muchos relatos, sin duda un poco adornados a lo largo de los años, sobre lo despistado que estaba cuando se trataba de cumplir con sus obligaciones como agricultor. Mientras Isaac (quizá hasta cierto punto intencionadamente) demostraba su incompetencia en estas tareas, William, el hermano de Hannah que se había licenciado en Cambridge, apremiaba a la madre para que permitiera al joven seguir sus inclinaciones naturales y acceder a la universidad. La combinación de la capacidad persuasiva de su hermano y el desastre en que Isaac estaba convirtiendo su granja, hicieron finalmente que Hannah aceptara la situación y, en 1660 (el año de la Restauración) Isaac Newton volvió a la escuela con el fin de prepararse para ser admitido en Cambridge. Por consejo de Humphrey Babington, y sin duda gracias en parte a su influencia, Newton accedió a una plaza en el Trinity College el 8 de julio de 1661. Tenía entonces 18 años de edad — más o menos la edad a la que los estudiantes comienzan actualmente a ir a la universidad, pero siendo mayor que la mayoría de los jóvenes caballeros que llegaban a Cambridge en la década de 1660, cuando era habitual acceder a la universidad a los 14 o 15 años, acompañados por un criado.

Sin embargo, lejos de tener su propio sirviente, Isaac Newton tuvo que trabajar como sirviente él mismo. Su madre no iba a tolerar más que los gastos mínimos, para lo que ella seguía considerando como un derroche, y asignó al muchacho sólo 10 libras al año, aunque los ingresos de Hannah en aquella época eran bastante más de 700 libras al año. En aquella época, el hecho de ser el criado (llamado *subbecario*) de un estudiante podía ser extremadamente desagradable e incluir tareas tales como

vaciar los orinales del amo. También tenía unas claras connotaciones sociales negativas. Sin embargo, Newton fue en medio de todo afortunado, o al menos ingenioso; era oficialmente el estudiante de Humphrey Babington, pero éste rara vez estaba en el *college* y, además, era un amigo que no forzaba la relación amo-criado con Isaac. Incluso así, y posiblemente debido a su baja posición y, desde luego, a su carácter introvertido, parece ser que Newton lo pasó mal en Cambridge hasta principios de 1663, cuando conoció a Nicholas Wickins y entabló amistad con él. Ambos se sentían a disgusto con sus compañeros de habitación y decidieron compartir aposentos los dos juntos, cosa que hicieron de la manera más amistosa durante los 20 años siguientes. Es bastante probable que Newton fuera homosexual; sólo se relacionó estrechamente con hombres, aunque no hay pruebas de que estas relaciones se consumaran físicamente (de la misma manera que tampoco hay pruebas de que no se consumaran). Esto no tiene importancia alguna a la hora de considerar su trabajo científico, pero puede damos otra clave para entender su carácter reservado.

La vida científica comenzó cuando Newton tomó la decisión de ignorar en gran medida los programas de estudios de Cambridge como tales y se dedicó a leer lo que le apetecía, como, por ejemplo, las obras de Galileo y de Descartes. En la década de 1660, Cambridge estaba lejos de ser un centro de óptimo nivel académico. En comparación con Oxford, era una universidad estancada y, a diferencia de Oxford, no se había beneficiado de los contactos directos con los miembros del Gresham College. Todavía se enseñaba a Aristóteles y se exigía a los estudiantes que se lo aprendieran de memoria, y lo único para lo que resultaba adecuada la educación en Cambridge era para ser un sacerdote competente o un mal médico. Sin embargo, el primer indicio de lo que iba a ser más tarde se observó en 1663, cuando Henry Lucas aportó la dotación para que se creara una

cátedra de matemáticas en Cambridge —la primera cátedra científica de la universidad (y la primera cátedra de cualquier tipo que se creaba desde 1540)—. El primero que accedió a la cátedra *lucasiana* de matemáticas fue Isaac Barrow, que anteriormente había sido catedrático de griego (lo que da una cierta idea del nivel que tenía la ciencia en Cambridge en aquellos tiempos). El nombramiento fue doblemente importante —en primer lugar, porque Barrow enseñó matemáticas (es muy posible que su primer curso de clases magistrales, impartido en 1664, estimulara el interés de Newton por la ciencia) y además, como ya hemos visto, por lo que sucedió cuando dimitió de su cargo cinco años más tarde.

Según contaría el propio Newton más tarde, fue durante aquellos cinco años, de 1663 a 1668, cuando llevó a cabo la mayoría de los trabajos por los que actualmente es famoso. Hemos hablado ya de sus trabajos sobre la luz y el color, que acabaron en la famosa pelea con Hooke. Pero, hay otros dos trabajos que hemos de situar en su contexto —la invención de las técnicas matemáticas que hoy en día conocemos como cálculo infinitesimal (a las que Newton llamó fluxiones) y su trabajo sobre la gravedad que dio lugar a los *Principia*.

18. Una página de las publicaciones y cartas de Newton sobre Filosofía Natural.

Fuera cual fuese el estímulo concreto que le impulsó, en 1664 Newton era un aplicado becario (aunque nada convencional) y estaba ansioso por permanecer más tiempo en Cambridge. El modo en que lo consiguió fue, en primer lugar, obtener una de las pocas becas que se otorgaban a estudiantes no licenciados y luego, después de algunos años, ganar las elecciones para convertirse en miembro de la junta directiva del *college*. En abril de 1664, Newton consiguió dar el primer paso esencial, al ganar una beca, a pesar de no haber realizado el curso previo obligatorio, pero seguramente gracias a la influencia de Humphrey Babington, que por entonces era ya uno de los miembros más antiguos del *college*. Esta beca le reportaba a Newton unos pequeños ingresos, le bastaba para su manutención y le libraba del estigma de ser un *subbecano*: también significaba que, después de recibir su licenciatura en humanidades en enero de 1665 (en aquellos tiempos, una vez que alguien era aceptado en Cambridge, era imposible no conseguir una licenciatura, salvo que optara, como hacían muchos, por marcharse antes de tiempo), podía permanecer en la residencia, estudiando lo que quisiera, hasta lograr el doctorado en humanidades, cosa que sucedió en 1668.

El desarrollo del cálculo infinitesimal

Newton tenía un carácter obsesivo que le hacía dedicarse en cuerpo y alma a cualquier proyecto que tuviera entre manos. Podía olvidarse de comer o dormir mientras estudiaba o realizaba experimentos, y llevó a cabo algunos bastante peligrosos, experimentando consigo mismo, cuando estaba estudiando óptica. Por ejemplo, se puso a mirar al Sol durante tanto tiempo que casi llegó a quedarse ciego, e incluso hurgó en su ojo con un punzón (una aguja gruesa, sin punta y con un ojo grande) para estudiar las imágenes de colores que surgían con estas

brutales manipulaciones. Durante los años posteriores de su vida siguió aflorando el mismo comportamiento obsesivo, ya fuera en las tareas que realizó en la Casa de la Moneda, o en sus numerosas discusiones con personas tales como Hooke y Gottfried Leibniz, el otro inventor del cálculo infinitesimal. Aunque no existen dudas con respecto a que Newton fue el primero al que se le ocurrió la idea a mediados de la década de 1660, tampoco hay dudas de que Leibniz (que vivió desde 1646 hasta 1716) llegó a lo mismo de forma independiente un poco después (Newton no se había preocupado de comunicar a nadie el trabajo que estaba haciendo en aquel momento), ni de que la versión que consiguió Leibniz era más fácil de entender. No es mi intención entrar en los detalles matemáticos del asunto; la cualidad fundamental del cálculo infinitesimal es que hace posible realizar cálculos más precisos, a partir de una situación inicial conocida, con magnitudes que varían a medida que transcurre el tiempo, como sucede, por ejemplo, con la posición de un planeta que va recorriendo su órbita. Sería muy aburrido entrar en todos los detalles relativos a la discusión entre Newton y Leibniz; lo importante es que ambos desarrollaron el cálculo infinitesimal durante la segunda mitad del siglo XVII, proporcionando a los científicos del siglo XVIII y de los siglos posteriores las herramientas matemáticas que necesitaban para estudiar procesos en los que se producen cambios. Sencillamente, las modernas ciencias físicas no existirían sin el cálculo infinitesimal.

Las grandes ideas de Newton con respecto a estos métodos matemáticos y los primeros pasos en su investigación sobre la gravedad se produjeron en la época en que la vida rutinaria de Cambridge se vio interrumpida por la amenaza de la peste. Poco después de que Newton obtuviera la licenciatura, la universidad se cerró temporalmente y sus estudiantes se dispersaron huyendo de la peste. En el verano de 1665, Newton regresó a

Lincolnshire, donde permaneció hasta marzo de 1666. En aquel momento parecía ya seguro regresar a Cambridge, pero el tiempo volvió a ser caluroso y la peste brotó una vez más, por lo que en junio Newton se marchó de nuevo al campo, quedándose en Lincolnshire hasta abril de 1667, cuando la peste había ya desaparecido. Mientras estuvo en Lincolnshire, Newton repartió su tiempo entre Woolsthorpe y la rectoría de Babington en Boothby Pagnell, por lo que no se sabe con certeza dónde ocurrió el famoso episodio de la manzana (si es que ocurrió realmente entonces, como afirmaba Newton). Sin embargo, lo que sí es cierto es que, en palabras del propio Newton, escritas medio siglo más tarde, «en aquellos días estaba en mi mejor momento para la invención y prestaba más atención que nunca a las matemáticas y a la filosofía». A finales de 1666, en medio de esta racha de inspiración, Newton cumplió sus 24 años.

Tal como Newton la contó posteriormente, la anécdota es que, en algún momento durante los años de la peste, vio cómo caía una manzana de un árbol y se preguntó si, dado que la influencia de la gravedad podía llegar a la copa de un árbol, no podría también llegar hasta la Luna. Entonces calculó que la fuerza necesaria para mantener a la Luna en su órbita y la fuerza necesaria para hacer que una manzana cayera de un árbol podrían explicarse ambas a través de la gravedad terrestre, si dichas fuerzas disminuían en proporción inversa al cuadrado de la distancia al centro de la Tierra. Lo que se deduce, y el propio Newton se preocupó cuidadosamente de que se viera así, es que, en 1666, mucho antes de que se produjeran las discusiones entre Halley, Hooke y Wren, Newton ya tenía la ley de la gravitación universal o ley del cuadrado inverso. Pero, hay que tener en cuenta que Newton era un genio a la hora de reescribir la historia, y la ley de la gravitación universal surgió de una forma mucho más gradual que lo que la anécdota sugiere. Según las

pruebas escritas aparecidas en los propios documentos de Newton y que pueden datarse, no aparece nada sobre la Luna en los trabajos sobre la gravedad que él hizo durante los años de la peste. Lo que le hizo empezar a reflexionar sobre la gravedad fue el viejo argumento utilizado por los que se oponían a la idea de que la Tierra podía girar sobre su propio eje; este argumento consistía en decir que la consecuencia de dicho giro podría ser que se rompiese y los fragmentos salieran volando por el efecto de la fuerza centrífuga. Newton calculó el valor de esta fuerza ejercida hacia afuera en la superficie de la Tierra y la comparó con el valor resultante de medir la fuerza de la gravedad, demostrando que la gravedad en la superficie de la Tierra es cientos de veces mayor que dicha fuerza ejercida hacia afuera, por lo que el viejo argumento no se sostenía. Posteriormente, en un documento escrito cierto tiempo después de regresar a Cambridge (pero, desde luego, antes de 1670), Newton comparó estas fuerzas con el «esfuerzo de la Luna por retroceder alejándose del centro de la Tierra» y descubrió que la gravedad «en la superficie terrestre» era alrededor de 4000 veces más fuerte que la fuerza hacia el exterior (fuerza centrífuga) necesaria para que la Luna continuara recorriendo su órbita. Esta fuerza hacia el exterior equilibraría la fuerza de la gravedad terrestre, si la gravedad disminuía según la ley de la gravitación universal o ley del cuadrado inverso, pero Newton no afirmó esto explícitamente en su momento. Sin embargo, se dio cuenta también, a partir de las leyes de Kepler, de que los «esfuerzos de los planetas por alejarse del Sol» eran inversamente proporcionales a los cuadrados de sus distancias al Sol.

Haber llegado tan lejos en 1670 es impresionante, pero no tanto como el mito que Newton cultivó después con tanta insistencia. Además, recordemos que en esta época, cuando aún no había cumplido los 30 años, había terminado ya la parte esencial de su obra sobre la luz y el cálculo infinitesimal. Sin em-

bargo, la investigación sobre la gravedad quedó relegada entonces, porque Newton se entregó a una nueva pasión: la alquimia. Durante las dos décadas siguientes, Newton dedicó mucho más tiempo y esfuerzo a la alquimia que el que había dedicado a todos los trabajos científicos que actualmente estimamos tanto, pero, dado que la nueva actividad le condujo a un callejón sin salida, no tiene sentido que dediquemos aquí un espacio a comentar detalladamente sus trabajos sobre alquimia.[9] También tuvo otras distracciones relacionadas con su puesto en el Trinity College y con sus propias convicciones religiosas, por cierto nada ortodoxas.

En 1667, Newton fue elegido como miembro secundario del consejo de gobierno del Trinity College, y se convertiría automáticamente en miembro principal en 1668, al conseguir el doctorado. Esto le daba la posibilidad de seguir dedicándose a hacer lo que deseara durante siete años más, pero era preceptivo declarar un compromiso con la religión en su versión más ortodoxa —concretamente, al asumir esta categoría, todos los nuevos miembros del consejo de gobierno del *college* tenían que formular el siguiente juramento: «La teología será el objeto de mis estudios y tomaré las órdenes sagradas cuando llegue el momento prescrito por estos estatutos, o bien abandonaré el *college*»—. El problema estaba en que Newton era arriano.[10] A diferencia de Bruno, Newton no estaba dispuesto a ir a la hoguera por sus creencias, pero tampoco estaba dispuesto a comprometerlas jurando que creía en la Santísima Trinidad, un juramento que sería necesario para tomar las órdenes sagradas. Ser arriano en Inglaterra a finales del siglo XVII no era realmente un delito grave, pero, si se descubría, Newton quedaría excluido de cualquier cargo público y, desde luego, sería expulsado de un *college* que llevaba el nombre de la Trinidad. Aquí tenemos otra razón más para entender que fuera una persona reservada e introvertida; y además, a principios de la década de

1670, quizá buscando una vía de escape, Newton desarrolló otra de sus obsesiones de larga duración, consistente en llevar a cabo un estudio riguroso de la teología (una actividad que rivalizaba con sus estudios de alquimia y explicaba en parte por qué no llegó a realizar innovaciones en la ciencia hasta después de haber cumplido los 30 años de edad). No fueron estos esfuerzos los que le salvaron, sino una curiosa estipulación en las condiciones del compromiso que habían sido establecidas por Henry Lucas para la cátedra que llevaba su nombre.

Newton había sucedido a Barrow como catedrático *lucasiano* en 1669, cuando tenía 26 años. La curiosa estipulación anteriormente mencionada, que iba en contra de todas las tradiciones de la universidad, establecía que cualquier titular de esta cátedra tenía prohibido aceptar cargos eclesiásticos que exigieran residir fuera de Cambridge o dedicarse a «salvar almas». En 1675, utilizando esta estipulación como excusa, Newton consiguió que Isaac Barrow (que entonces era director del Trinity College) le diera permiso para solicitar al rey una dispensa que excusara a todos los catedráticos *lucasianos* de la obligación de tomar las órdenes religiosas. Carlos II, patrocinador de la Royal Society (donde Newton era ya famoso por su telescopio de espejo y sus trabajos sobre la luz) y un entusiasta de la ciencia, concedió esta dispensa a perpetuidad, «para dar todo tipo de incentivos a los eruditos que son y serán elegidos para la mencionada cátedra». Newton estaba a salvo: acogiéndose a la dispensa del rey, no tendría que tomar las órdenes sagradas y, además, el *college* suspendería la norma según la cual hubiera tenido que marcharse al finalizar sus siete años iniciales como miembro de la junta de gobierno.

Las disputas entre Hooke y Newton

En medio de toda esta ansiedad motivada por los problemas que afectaban a su futuro en Cambridge, Isaac Newton se vio envuelto también en una disputa con Hooke relativa a la prioridad del uno o el otro en el desarrollo de la teoría de la luz. Esta polémica culminó en 1675 con la carta donde se mencionaban las «espaldas de gigantes», como ya hemos comentado anteriormente. Ahora podemos entender por qué Newton se sentía tan irritado por todo este asunto —estaba mucho más preocupado por su posición futura en Cambridge que por ser educado con Hooke—. Sin embargo, paradójicamente, mientras Newton había dejado de desarrollar sus teorías sobre la gravedad, en 1674, Hooke había dado con el núcleo del problema del movimiento orbital. En un tratado que se publicó aquel mismo año, descartó la idea de un equilibrio entre las fuerzas que empujaban hacia dentro y las que empujaban hacia afuera, para mantener a un objeto cono la Luna en su órbita. Constató que el movimiento orbital resultaba de sumar, por una parte, la tendencia de la Luna a moverse en línea recta y, por otra, una fuerza «única» que la atraía hacia la Tierra. Newton, Huygens y todos los demás hablaban todavía de «una tendencia a alejarse del centro», o utilizaban una expresión similar, y la consecuencia, incluso en las teorías de Newton, era que algo parecido a los vórtices turbulentos de Descartes era responsable de impulsar a los objetos para que volvieran a situarse en sus órbitas, a pesar de su tendencia a desplazarse hacia el exterior. Hooke también prescindió de los vórtices, introduciendo la idea de lo que actualmente llamaríamos «acción a distancia» —la gravedad, que se transmitiría a través del espacio «vacío» para ejercer una tracción sobre la Luna o los planetas.

En 1679, cuando ya había desaparecido la polvareda levantada por su confrontación inicial, Hooke escribió a Newton para pedirle su opinión sobre estas teorías (que ya se habían publicado). Fue Hooke quien proporcionó a Newton la idea de una ac-

ción a distancia, que apareció inmediatamente, sin comentarios, en todos los trabajos que Newton realizó sobre la gravedad a partir de aquel momento. También le sugirió la idea de que una órbita era una línea recta que se curvaba por efecto de la gravedad. Pero Newton era reacio a dejarse convencer y escribió a Hooke lo siguiente:

> Durante varios años había estado esforzándome por pasar de la filosofía a otros estudios, ya que he lamentado ampliamente el tiempo invertido en aquel estudio… Espero que no se interpretará como falta de cortesía hacia usted o hacia la Royal Society el hecho de que haya vuelto a dedicarme a estas materias.

A pesar de esto, Newton sugirió un modo de comprobar la rotación de la Tierra. Anteriormente, se había dicho que la rotación de la Tierra se pondría de manifiesto arrojando un objeto desde una torre suficientemente alta, ya que el objeto se quedaría retrasado a causa de la rotación de la Tierra y caería detrás de la torre. Newton indicó que la parte superior de la torre tendría que moverse a mayor velocidad que su base, ya que estaba más lejos del centro de la Tierra y, por consiguiente, tenía que recorrer una circunferencia mayor para dar una vuelta completa en 24 horas. Por lo tanto, el objeto que se arrojaba tendría que aterrizar delante de la torre. Bastante descuidadamente, en un dibujo mediante el cual pretendía explicar lo que quería decir, Newton trazó la trayectoria del cuerpo que caía como si la Tierra no estuviera allí, describiendo una espiral hacia el centro de la Tierra bajo la influencia de la gravedad, Pero terminó la carta diciendo:

> Sin embargo, ahora que mi afición a la filosofía se ha agotado, de tal forma que me preocupo por ella casi tan poco como un comerciante se preocupa por los negocios de otro, o un campesino por la erudición, debo reconocer mi aversión a pasar el tiempo escribiendo sobre ella, cuando pienso que puedo pasarlo de otra forma que me complace más.

No obstante, el hecho de dibujar aquella espiral llevaba a Newton a estar más relacionado con la «filosofía», tanto si le

gustaba como si no. Hooke señaló el error y sugirió que la trayectoria correcta de la caída del objeto, suponiendo que pudiera atravesar el volumen sólido de la Tierra sin resistencia, sería una elipse que se iba contrayendo. Newton, a su vez, corrigió la hipótesis de Hooke, demostrando que el objeto que orbitaba dentro de la Tierra no descendería gradualmente hacia el centro recorriendo ninguna trayectoria, sino que permanecería en órbita indefinidamente, siguiendo un recorrido similar a una elipse, pero de tal forma que toda la órbita cambiaría de lugar con el paso del tiempo. Hooke, por su parte, replicó ante el hecho de que el cálculo de Newton estuviera basado en una fuerza de atracción «con una magnitud siempre igual a cualquier distancia del centro… Pero, lo que yo supongo es que la atracción siempre es dos veces proporcional a la inversa de la distancia al centro», en otras palabras, estaba enunciando una ley del cuadrado inverso.

Newton no se molestó en responder a esta carta, pero es evidente que, a pesar de que su afición a la filosofía se estaba agotando, éste fue el detonante que le estimuló para «demostrar», en 1680, que una ley de la gravedad con cuadrados inversos exige que los planetas se muevan recorriendo órbitas elípticas o circulares, e implicaba que los cometas debían seguir trayectorias elípticas o parabólicas alrededor del Sol.[11] Ésta es la razón por la que ya tenía la respuesta preparada cuando, en 1684, Halley se presentó en la puerta de su casa.

Los «Principia Mathematica» de Newton: la ley de la gravitación universal y las tres leyes del movimiento

Después de esto, no se puede decir que todo fuera coser y cantar, pero el hecho de que Halley le engatusara y animara tras su encuentro en Cambridge le llevó en primer lugar a la publicación de un trabajo de nueve páginas, en noviembre de 1684,

en el que explicaba la ley del cuadrado inverso, y luego, en 1687, a la publicación de lo que fue la gran obra épica de Newton, *Philosophiae Naturatis Principia Mathematica,* en la que estableció las bases para toda la física, no sólo enunciando las implicaciones de su ley de la gravedad universal o ley del cuadrado inverso, y de sus tres leyes del movimiento, que describen el comportamiento de todo lo que hay en el universo, sino también dejando claro que las leyes de la física son realmente leyes «universales» que afectan a cualquier objeto. Hubo ocasión todavía para que aflorara otra característica más de la personalidad de Newton —cuando Hooke se quejó porque el manuscrito, al que tuvo acceso en calidad de miembro de la Royal Society, no le daba suficiente crédito (una queja justificada, ya que él había descubierto y comunicado ideas importantes, aunque no hubiera tenido la habilidad necesaria para llevar a cabo el trabajo matemático, una habilidad que Newton sí tenía), la reacción de Newton fue amenazar con la retirada de la publicación del tercer volumen y luego revisó el texto antes de enviarlo a la imprenta, suprimiendo radicalmente cualquier referencia a Hooke.

Aparte de la brillantez matemática demostrada por Newton en el modo en que hizo que todo encajara, la razón por la que los *Principia* produjeron un impacto tan fuerte es que lograron materializar lo que los científicos habían estado buscando a tientas, a veces sin ser conscientes de ello, desde los tiempos de Copérnico: la constatación de que el universo funciona según unos principios esencialmente mecánicos susceptibles de ser comprendidos por los seres humanos, y que el mundo no está regido por la magia ni por los caprichos de unos dioses veleidosos.

Para Newton, y para muchos de sus contemporáneos (pero no todos), seguía existiendo un papel desempeñado por Dios como arquitecto de todo lo existente, incluso como un arqui-

tecto «sobre el terreno» que intervendría de vez en cuando para garantizar el correcto funcionamiento de Su creación. Pero cada vez iba quedando más claro en la mente de muchos científicos posteriores a Newton que, comoquiera que empezara, una vez que el universo estuvo configurado y funcionando, no necesitó ya ninguna interferencia del exterior. La analogía que se utiliza a menudo es la del mecanismo de relojería. Pensemos en un gran reloj, como los que había en los campanarios de las iglesias en la época de Newton, no sólo con manecillas para marcar la hora, sino también con figurar de madera que emergen del interior del reloj, representando una escena y haciendo sonar el carillón con un martillo que golpea una campana. La actividad es de una gran complejidad en la superficie, pero todo sucede como resultado del tictac de un sencillo péndulo. Newton abrió los ojos de los científicos al hecho de que los fundamentos del universo podrían ser igual de sencillos y comprensibles, a pesar de ser complejos en la superficie. Newton tuvo también una clara percepción del método científico y en una ocasión escribió lo siguiente al jesuita francés Gastón Pardies:

> El mejor método, y el más seguro, para filosofar parece ser indagar primero con diligencia las propiedades de las cosas, y establecer dichas propiedades a partir de experiencias, para luego proceder más lentamente a formular hipótesis encaminadas a explicarlas. Ya que las hipótesis deberían utilizarse exclusivamente para explicar las propiedades de las cosas, y no ser asumidas para determinar estas propiedades; al menos en la medida en que permitan la realización de experimentos.

En otras palabras, la ciencia trata de hechos, no de fantasías.

La publicación de los *Principia* marcó el momento en que la ciencia llegó a la mayoría de edad como una disciplina intelectual madura, dejando a un lado sus locuras de juventud y comenzando a normalizarse a través de investigaciones cada vez más consistentes sobre el universo. Sin embargo, esto no se produjo sólo gracias a Newton. Era un hombre de su tiempo, que decía claramente con palabras (y, lo que es fundamental,

con ecuaciones) unas ideas que borboteaban por todas partes, que podía expresar más definidamente que otros científicos lo que éstos pugnaban ya por expresar. Ésta es otra razón por la que su libro suscitó tantas reacciones —dio en la diana, porque el tiempo estaba maduro para tal compendio de ideas y para que se estableciesen los fundamentos de la ciencia—. Para casi todos los científicos que leyeron los Principia, debió de ser como el pasaje de *The Search*, de C. P. Snow, en el que se dice: «Vi cómo una mezcolanza de hechos fortuitos concordaban entre sí y se colocaban en orden… Pero, es verdad —me dije a mí mismo—, es muy hermoso, y además es cierto».

Como resultado de la publicación de los Principia, Newton llegó a ser un científico famoso, extendiéndose su renombre mucho más allá del círculo de la Royal Society. El filósofo John Locke, un amigo de Newton, escribió sobre este libro lo siguiente:

> El incomparable señor Newton ha demostrado lo lejos que nos pueden llevar las matemáticas en el conocimiento de algunas provincias especiales, si podemos llamarlas así, del incomprensible universo, si aplicamos esta ciencia a ciertas partes de la naturaleza, a través de principios que se justifican como una cuestión de hecho.

Sin embargo, en 1687, Newton había dejado de ser un científico (cumpliría 45 años de edad al final de este año y hacía mucho tiempo que había perdido su afición a la filosofía). Ciertamente, su obra *Opticks* se publicaría a principios del siglo XVIII —pero se trataba de antiguos trabajos que habían permanecido guardados hasta que Hooke murió y pudieron publicarse sin dar a éste opción a hacer comentarios sobre ellos o a reclamar que debieran algo a su propia obra sobre la luz—. Sin embargo, la situación a la que Newton accedió por haber publicado los *Principia* pudo ser uno de los factores que le animaron a convertirse en una figura pública, pero en otro sentido, y, aunque el resto de su vida tuvo poca relación directa con la ciencia, va-

le la pena hacer un esbozo sobre todo lo que realizó al margen de su obra científica.

Los últimos años de la vida de Newton

La primera actuación de Newton en el escenario político se produjo a principios de 1687, después de que los *Principia* hubieran salido de sus manos y la supervisión de la edición corriera a cargo de Halley. Jacobo II había sucedido a su hermano en 1685 y, tras comenzar prudentemente su reinado, en 1687 ya estaba comenzando a hacer demostraciones de poder. Entre otras cosas, intentó extender la influencia católica a la Universidad de Cambridge. Newton, que por entonces era uno de los miembros más antiguos de la junta de gobierno del Trinity College (y quizás influido por el temor a lo que podría sucederle como arriano bajo un régimen católico), fue uno de los líderes de la oposición a estos intentos en Cambridge y también fue uno de los nueve miembros que tuvieron que comparecer ante el famoso juez Jeffreys para defender su postura. Cuando Jacobo II fue expulsado del trono a finales de 1688 y sustituido, a principios de 1689, por Guillermo de Orange (nieto de Carlos I) y su esposa María (hija de Jacobo II) en la llamada Revolución Gloriosa,[12] Newton fue designado como uno de los dos parlamentarios que envió a Londres la Universidad de Cambridge. Aunque estuvo lejos de ser un parlamentario activo y no se presentó a la reelección cuando el Parlamento, después de haber cumplido su tarea de legalizar la toma del poder por parte de Guillermo y María, se disolvió a principios de 1690, el hecho de disfrutar la vida londinense y participar en grandes acontecimientos acentuó la creciente insatisfacción que sentía Newton con respecto a Cambridge. A pesar de que se sumergió en sus trabajos de alquimia a principios de la década de 1690, parece ser que en 1693 sufrió una importante depresión nerviosa

provocada por años de trabajo excesivo, la tensión de estar ocultando sus convicciones religiosas contrarias a la ortodoxia y, posiblemente, la ruptura de una estrecha amistad que había mantenido durante los tres años anteriores con un joven matemático suizo, Nicholas Fatio de Duillier, conocido habitualmente como Fatio. Cuando se recuperó, Newton estuvo buscando casi desesperadamente algún modo de salir de Cambridge, y agarró la ocasión al vuelo cuando en 1696 le ofrecieron el cargo de custodio de la Casa de la Moneda (gracias a Charles Montague, un antiguo estudiante de Cambridge, nacido en 1661, que conocía a Newton y era por aquel entonces ministro de Hacienda) aunque también encontró tiempo para ejercer la presidencia de la Royal Society desde 1695 hasta 1698.

El custodio era el número dos en importancia dentro de la Casa de la Moneda y se podía considerar como un cargo retribuido en el que se trabajaba poco. Pero, dado que, de hecho, el director de la Casa de la Moneda ejercía su cargo trabajando lo menos posible, Newton tuvo oportunidad de poner sus manos en las palancas del poder. Ejerció el cargo actuando según su carácter obsesivo, llevando a cabo una importante reacuñación y tomando medidas enérgicas contra los falsificadores con ferocidad y con unas actuaciones despiadadas que llevó a cabo con sangre fría: el castigo era habitualmente la horca y Newton se hizo magistrado con el fin de asegurarse de que tenía la ley de su parte. En 1699, cuando el director de la Casa de la Moneda falleció, Newton ocupó su cargo, siendo aquella la única vez en la larga historia de esta institución en que un custodio ascendió de esta manera. El gran éxito que tuvo en la Casa de la Moneda le animó (probablemente a instancias de Montague, que para entonces se había convertido en lord Halifax y más tarde llegó a ser el conde de Halifax) a presentarse de nuevo para entrar en el Parlamento, cosa que consiguió en 1701, prestando sus servicios en la cámara hasta mayo de 1702, cuando

Guillermo II murió (María había fallecido con anterioridad en 1694) y el Parlamento fue disuelto. A Guillermo II le sucedió Ana, la segunda hija de Jacobo II, sobre la cual, antes y durante su reinado de doce años, ejerció una gran influencia Halifax. Durante la campaña electoral de 1705, la reina Ana nombró caballeros a Newton, que era un protegido de Halifax, y también al hermano de éste, con la esperanza de que tal honor animaría a los votantes a apoyarlos.

Pero esto no les benefició —el partido de Halifax en bloque perdió las elecciones, y Newton, que tenía ya más de sesenta años, las perdió individualmente, y nunca volvió a presentarse —. Pero merece la pena relatar estos hechos, porque mucha gente Piensa que Newton fue nombrado caballero por sus tareas científicas y algunos creen que el nombramiento se debió a su trabajo en la Casa de la Moneda, aunque la verdad es que el factor determinante fue el sucio oportunismo político de Halifax, que influyó en el asunto como una parte de su estrategia para ganar las elecciones de 1705.

La muerte de Hooke y la publicación de la «Óptica» de Newton

En aquel momento, sin embargo, Newton se sintió contento de estar fuera de la política, ya iba a entrar en su última gran etapa. Hooke había muerto en marzo de 1703 y Newton, que se había mantenido en gran medida apartado de la Royal Society mientras Hooke, que había sido uno de sus creadores, estuvo en ella, fue elegido presidente de esta asociación en noviembre de aquel año. *Opticks* se publicó en 1704 y Newton gestionó la Royal Society con su habitual atención meticulosa durante las dos décadas siguientes. En 1710, una de las tareas que tuvo que supervisar fue el traslado de la sede situada en el Gresham College, que se les había quedado pequeña, a unas instalaciones más

amplias en Crane Court. No hay duda de que este traslado era necesario desde hacía mucho tiempo —un visitante que llegó al Gresham College justo antes de que se realizara este traslado escribió: «finalmente nos mostraron la habitación donde se reúne habitualmente la Royal Society. Es muy pequeña y pobre: lo mejor que hay allí son los retratos de sus miembros, entre los cuales los más notables son los de Boyle y Hooke».[13] Había muchos retratos que tenían que ser trasladados del Gresham College a Crane Court, siendo supervisado este traslado por sir Isaac Newton, que era sumamente estricto con los detalles. El único que se perdió, y nunca volvió a ser visto, fue el de Hooke. No ha sobrevivido ningún retrato de él. Si Newton llegó hasta tales extremos para intentar minimizar el papel de Hooke en la historia de la ciencia, esto quiere decir que Hooke tuvo que ser realmente un científico muy destacado.

Hooke fue la persona que había desempeñado el papel más decisivo a la hora de hacer que la Royal Society funcionara, y Newton fue quien la moldeó hasta darle la forma en la que llegó a ser la sociedad científica más importante del mundo durante dos siglos o más. Pero a Newton el éxito y la fama no le hicieron madurar. Como presidente de la Royal Society se vio envuelto en otra discusión poco edificante, esta vez con Flamsteed, el primer astrónomo real, que se negaba a publicar su nuevo catálogo de estrellas hasta que todo se hubiera comprobado una y otra vez, mientras que todos los demás estaban desesperados porque no veían llegar el momento de tener aquellos datos en sus manos. A pesar de todas sus desagradables disputas, los logros de Newton en la Casa de la Moneda o en la Royal Society habrían bastado para convertirle en una importante figura histórica, aunque nunca hubiera sido un gran científico.

Era Catherine Barton, sobrina de Newton, la que se encargaba de llevar la casa de éste en Londres, en el sentido de indicar a los sirvientes qué tenían que hacer, ya que su tío era en aque-

lla época un hombre muy rico. Nacida en 1679, Catherine era la hija de Hannah Smith, la hermanastra de Newton, que se había casado con Robert Barton, el cual falleció en 1693 dejando a su familia en la miseria. Newton fue siempre generoso con sus parientes y Catherine era una mujer de extraordinaria belleza y una excelente ama de casa. No hay indicios del tipo de trampas que Hooke hizo con su propia sobrina, pero Catherine conquistó a Halifax, quien según parece se encontró con ella por primera vez alrededor de 1703, cuando pasaba ya de los cuarenta años y hacía poco que había enviudado. En 1706, Halifax escribió un testamento en el que, entre otros legados, dejaba a Catherine 3000 libras esterlinas y todas sus joyas, especificando que eran «como una pequeña muestra del gran amor y afecto que he sentido por ella durante mucho tiempo». Aquel mismo año, consiguió para ella una anualidad de 300 libras esterlinas, lo cual equivalía al triple del sueldo de un astrónomo real. Además, en 1713, un año antes de llegar a ser primer ministro bajo el reinado de Jorge I,[14] modificó su testamento para dejarle una anualidad de 5000 libras esterlinas (50 veces los ingresos anuales de Flamsteed) y una casa (que en realidad no era de su propiedad, pero eso es un detalle sin importancia) «como muestra del sincero amor, afecto y estima que he sentido por su persona durante mucho tiempo, y como una pequeña recompensa por el placer y la felicidad que me ha dado con su conversación». La elección de estas palabras produjo sonoras carcajadas cuando se hizo público el testamento a la muerte de Halifax, en 1715, y no fue Flamsteed, el enemigo encarnizado de Newton, el que menos se rió. Si hubo en todo aquello algo más que «conversación», eso nunca lo sabremos. Pero es fácil darse cuenta de que el testamento era extraordinariamente generoso —el propio Newton, cuando murió a los 85 años el 28 de marzo de 1727, dejó poco más de 30 000 libras esterlinas repartidas a partes iguales entre ocho sobrinos y sobrinas que te-

nía por el segundo matrimonio de su madre—. Por lo tanto, Catherine recibió mucho más de Halifax por sus habilidades como conversadora, que de su muy adinerado tío.

Mientras otros científicos estaban todavía enterándose de las implicaciones de los Principia al comienzo del siglo XVIII (de hecho, las ciencias físicas durante todo este siglo estuvieron, en cierto modo, a la sombra de Newton), la primera persona que aceptó el desafío y la oportunidad que le ofrecía la obra de Newton fue Edmond Halley, que no sólo había sido la comadrona que ayudó al nacimiento de este libro, sino también, hablando científicamente, el primer científico posnewtoniano. Hooke y Newton fueron, por lo que respecta a la ciencia, unas figuras totalmente características del siglo XVII, aunque ambos vivieron también en el siglo siguiente. Sin embargo, Halley, que era más joven que Newton, vivió a caballo entre las dos épocas, siendo una figura de la transición y realizando parte de su mejor trabajo en el siglo XVIII, después de la revolución newtoniana. No obstante, como ya veremos, consiguió durante su vida englobar más elementos incluso que Hooke y Newton juntos.

Capítulo 6

HORIZONTES EN EXPANSIÓN

Durante el siglo posterior a Newton, el cambio más profundo que se produjo en cuanto a la comprensión del lugar que ocupa la especie humana en el universo fue la constatación cada vez más generalizada de la inmensidad del espacio y de la enormidad del intervalo de tiempo transcurrido en el pasado. En ciertos aspectos, el siglo XVIII representa una puesta al día que tuvo lugar cuando la ciencia en general se adaptó al modo en que Newton había codificado la física y había demostrado que el universo tiene una naturaleza ordenada y regida por leyes. Estas ideas se extendieron desde la propia física, el núcleo de la ciencia, hasta otras disciplinas obviamente relacionadas, como la astronomía y la geología; pero también se difundió lentamente hacia las ciencias biológicas, donde podemos ver en una visión retrospectiva que las pautas y las relaciones entre los seres vivos se establecieron como precursores esenciales para el descubrimiento de las leyes según las cuales funciona el mundo de dichos seres vivos, particularmente la ley de la evolución y la teoría de la selección general. También la química se volvió más científica y menos mística a medida que iba avanzando el siglo XVIII. Todo esto se situó en el marco de una enorme expansión del dominio que la ciencia intentaba explicar.

Lo más importante en relación con la ley de la gravedad universal de Newton (o de Hooke, o Halley, o Wren) no es el hecho de que sea una ley del cuadrado inverso, a pesar de lo interesante e importante que esto es, ni siquiera quién la inventó primero, sino que es «universal», es decir, se aplica a todo lo que hay en el universo y a todas las épocas de su historia. La persona que aportó esto al mundo científico (y fue también uno de los primeros que ampliaron las fronteras del tiempo) fue Edmond Halley, al que hemos visto por última vez cuando estaba actuando de comadrona en la publicación de los *Principia*. Esta publicación fue una tarea de gigantes. Además de apaciguar a Newton cuando se enfadaba con personas como Hooke, tratar con los impresores, leer las pruebas y hacer otras tareas diversas, Halley acabó pagando la publicación del libro, a pesar de que su propia situación financiera era entonces difícil. En mayo de 1686, la Royal Society, a la sazón bajo la presidencia de Samuel Pepys, accedió a publicar el libro con su propio sello y pagando los costes. Sin embargo, fue incapaz de cumplir este compromiso. Se ha sugerido que su alegación de falta de medios no fue sino una estratagema política que se decidió a usar como consecuencia de la disputa entre Newton y Hooke sobre prioridades, porque la Royal Society no deseaba que se le viera tomar partido; sin embargo, parece más probable que la Royal Society, por razones económicas, no estuviera realmente en situación de cumplir la promesa que le había hecho a Newton. Las finanzas de la Royal Society estuvieron pasando por altibajos durante las décadas posteriores a su fundación, en realidad hasta que el propio Newton puso las cosas en orden durante el tiempo en que fue presidente, y los escasos fondos que tenía disponibles se habían usado recientemente para pagar la publicación de *History of Fishes* de Francis Willughby. Este libro re-

sultó prácticamente invendible, quedando ejemplares de él incluso en el inventario de la Sociedad realizado en 1743, y esto dejó a la Royal Society tan arruinada que, en 1686, en vez de cobrar su salario de 50 libras esterlinas, Halley recibió 50 ejemplares del libro. Por suerte para Halley, y a diferencia de lo sucedido con *History of Fishes*, los Principia se vendieron moderadamente bien, a pesar de ser una obra muy técnica y estar escrita en latín, y pudo así obtener un modesto beneficio.

Al contrario que Newton, Halley no desempeñó papel alguno en la política relacionada con los problemas de la sucesión a finales del siglo XVII. Parece que Halley fue siempre totalmente apolítico, y en una ocasión comentaba lo siguiente:

> Por mi parte, estoy a favor de que gobierne el rey. Si estoy protegido, me siento satisfecho. Estoy seguro de que pagamos un precio suficientemente alto por nuestra protección; ¿por qué no disfrutar entonces de los beneficios de dicha protección?

Durante los años siguientes, manteniéndose fuera de la política, ocupado con su trabajo científico y sus tareas administrativas en la Royal Society, Halley llegó a desarrollar toda una diversidad de ideas, casi a la par de los logros conseguidos por Hooke en sus buenos tiempos de gran inventiva. Entre las ideas de Halley cabe citar una investigación sobre las posibles causas del diluvio universal que cita la Biblia, lo que le llevó a poner en cuestión la fecha de la creación, que entonces se fijaba en el 4004 a. C. (fecha determinada por el arzobispo Ussher en 1620 por el procedimiento de contar hacia atrás todas las generaciones que se citan en la Biblia). Halley aceptaba que se hubiera producido un acontecimiento catastrófico como el que describe la Biblia, pero, por comparación con el modo en que la erosión cambia actualmente las características de la superficie terrestre, vio que el diluvio tenía que haberse producido hacía mucho más de 6000 años. También intentó calcular la edad de la Tierra analizando la salinidad del mar, suponiendo que el

agua de los mares tenía que haber sido dulce en algún tiempo y que su salinidad habría ido incrementándose continuamente a medida que los ríos aportaban minerales al mar desde el interior, con lo que obtuvo un lapso de tiempo de una amplitud similar. Estas opiniones le llevaron a ser considerado como una especie de hereje por las autoridades eclesiásticas, aunque en aquel momento esto significaba tan sólo que tendría dificultades para conseguir un cargo académico, y no que fuera a morir quemado en la hoguera. Halley estaba interesado en el magnetismo terrestre y tenía la teoría de que las variaciones del magnetismo de un lugar a otro del globo, si se marcaban primero con exactitud en un mapa, podrían utilizarse para la navegación. También estudió las variaciones de la presión atmosférica y los vientos, publicando en 1686 un trabajo sobre los vientos alisios y los monzones, en el que aparecía incluido el primer mapa meteorológico de la historia. Sin embargo, también era un hombre práctico y realizó experimentos para el Ministerio de Marina, con una campana de buzo que inventó él mismo y que permitía a los hombres trabajar en el fondo del mar a una profundidad de 10 brazas (unos 18 metros) en turnos de dos horas. Al mismo tiempo, también realizó y publicó las primeras tablas de mortalidad humana, la base científica sobre la cual se efectúa el cálculo de las primas para los seguros de vida.

Los tránsitos de Venus

La primera contribución de Halley a la valoración del tamaño del universo llegó en 1691, después de que hiciera retroceder los límites de datación de la edad del universo, cuando publicó un trabajo en el que demostraba cómo las observaciones del tránsito de Venus cruzando la superficie solar, vistas desde distintos puntos situados sobre la superficie terrestre, se podían utilizar, mediante una variación de la técnica de triangula-

ción y del paralaje, para medir la distancia al Sol. Estos tránsitos de Venus son acontecimientos raros, pero predecibles, y Halley volvió al tema en 1716, cuando predijo que el siguiente par de tránsitos de este tipo se producirían en 1761 y 1769, y dejó instrucciones detalladas sobre el modo de hacer las observaciones necesarias. Pero, entre 1691 y 1716, la vida de Halley pasó por momentos extraordinariamente agitados.

El mismo año en que Halley publicó su primer trabajo sobre los tránsitos de Venus, la cátedra *saviliana* de astronomía de Oxford quedó vacante. Halley estaba ansioso (casi desesperado) por conseguir un cargo académico y habría sido un candidato ideal, si no hubiera sido por las objeciones de las autoridades eclesiásticas a sus teorías sobre la edad de la Tierra. Halley solicitó la plaza, aunque sin optimismo de ninguna clase, al tiempo que escribía a un amigo diciéndole que se había formulado «una advertencia contra mí, hasta que pueda demostrar que no soy culpable por afirmar que el mundo es eterno». De hecho, fue rechazado y se admitió a David Gregory, un protegido de Isaac Newton. Sin embargo, hay que decir en honor a la verdad que Gregory era un candidato excelente y, según parece, el nombramiento se decidió en gran medida según los méritos de los candidatos, y no sólo por las ideas religiosas poco convencionales de Halley.

EL ESFUERZO REALIZADO PARA CALCULAR EL TAMAÑO DE UN ÁTOMO

Podemos ver algunos indicios de lo que Oxford se estaba perdiendo si elegimos tan sólo uno de los trabajos entre los muchos que Halley llevó a cabo en aquella época. Le dio muchas vueltas al hecho de que objetos del mismo tamaño hechos de materiales diferentes tienen pesos también diferentes —un trozo de oro, por ejemplo, tiene siete veces el peso de un trozo

de vidrio del mismo tamaño—. Una de las conclusiones del trabajo de Newton es que el peso de un objeto depende de la cantidad de materia que contiene (es decir, de su masa), razón por la cual todos los objetos caen con la misma aceleración —la masa se anula en las fórmulas—. Así pues, razonaba Halley, el oro contiene siete veces la cantidad de materia que contiene el vidrio (a tamaños iguales), y por consiguiente el vidrio debe tener al menos seis séptimos de su espacio vacío. Esto le llevó a pensar en el concepto de átomo y a intentar hallar un modo para medir el tamaño de los átomos. Lo hizo calculando cuánto oro se necesitaba para recubrir un hilo de plata con el fin de obtener plata dorada. La técnica utilizada para esto consistía en sacar el hilo de un lingote de plata, poniendo oro alrededor de la circunferencia del hilo. Partiendo del tamaño conocido del trozo de oro que se utilizaba y del diámetro y la longitud del hilo final, resultó que la capa de oro que se ponía alrededor de la plata tenía un espesor de 1/134 500 de una pulgada (1/134 500 de 2,54 cm). Suponiendo que esto representara una única capa de átomos, Halley calculó que un cubo de oro con una arista de una centésima de pulgada (0,254 mm) contendría más de 2433 millones de átomos. Sin embargo, dado que la superficie de oro del hilo de plata dorada era tan perfecta que no se veía nada de la plata que estaba debajo, Halley sabía que incluso este número tan enorme debía ser muy inferior al número real de átomos. Todo esto se publicó en *Philosophical Transactions* de la Royal Society en 1691.

HALLEY VIAJA AL MAR PARA ESTUDIAR EL MAGNETISMO TERRESTRE

Frustrado en sus ambiciones académicas, tras algo más de un par de años Halley concibió un nuevo proyecto con su amigo Benjamín Middleton, un adinerado miembro de la Royal Society que parece haber sido el instigador de este proyecto. En

1693, propusieron al Ministerio de Marina realizar una expedición para encontrar modos de mejorar la navegación marítima, en particular estudiando el magnetismo terrestre en distintas partes del globo. En su diario, el 11 de enero de aquel año Robert Hooke escribe que Halley había hablado con él «sobre navegar en el barco de Middleton para realizar descubrimientos». En el lenguaje actual, esta expresión hace surgir la pregunta: «¿qué es lo que pensaban descubrir?». Pero, por supuesto, Hooke estaba utilizando la expresión, tal como lo diríamos hoy en día, en el sentido de «explorar». La propuesta, cualquiera que fuese exactamente, recibía una respuesta entusiasta por parte del Ministerio de Marina y, por orden directa de la reina (María II) se construyó especialmente para esta misión un pequeño barco, de un tipo conocido como pink,[*] que fue botado el 1 de abril de 1694. (Cuando Guillermo de Orange invadió Inglaterra en 1688 llevaba en su flota sesenta pinks). Esta nave se llamaba el *Paramore* y medía unos 16 metros de eslora, 5 metros de manga en su parte más ancha y alrededor de 3 metros de altura, con un desplazamiento de 89 toneladas. Se iba a utilizar para un viaje al lejano Atlántico Sur, aunque inicialmente la idea era realizar un viaje nada menos que alrededor del mundo.

Según los documentos que han llegado hasta nuestros días, poco más se volvió a oír sobre este proyecto durante los dos años siguientes, siendo bastante lenta la construcción de este barco. Es posible que esto haya sido una suerte para la ciencia, ya que durante este intervalo de tiempo Halley desarrolló su interés por los cometas, intercambiando una avalancha de cartas en las que discutía el tema con Newton y demostrando que muchos cometas recorren órbitas elípticas alrededor del Sol, obedeciendo la ley de la gravitación universal. Estudiando los datos históricos, Halley comenzó a sospechar que el cometa visto en 1682 describía una órbita de este tipo y que había sido visto al menos en tres ocasiones anteriores, a intervalos de 75 o

76 años. Nada de esto se publicó en aquella época, en gran medida debido a que Flamsteed disponía de las observaciones más precisas del cometa de 1682 y no dejaría a nadie que las viera, especialmente a Halley, con el que ya no se hablaba. Newton, que sí mantenía buenas relaciones con Flamsteed en aquel momento, intentó convencerle para que le pasara los datos, pero, con harto dolor, recibió una carta de Flamsteed diciéndole que Halley «casi se había armiñado a causa de su comportamiento indiscreto» y aludía a actuaciones «demasiado sucias y complicadas para [ser mencionadas] en una carta». No hay pruebas de que Halley fuera más indiscreto o «sucio» que otros contemporáneos suyos, como Pepys y Hooke, pero sí hay indicios de que Flamsteed fue bastante remilgado para lo que se estilaba en su época.

En 1696, la expedición del *Paramore* parecía estar por fin preparada para partir, pero sufrió un inexplicable revés en el último momento. El 19 de junio, la Junta Marítima recibió una carta de Halley en la que aparecía una lista de la tripulación del barco, con 15 marineros y 2 grumetes, además de él mismo, Middleton y un criado, lo cual indica claramente que estaban preparados para zarpar. Sin embargo, no se volvió a saber más de Middleton, aunque en agosto el barco fue botado. Lo más probable es que Middleton fuera la causa de este retraso al haberse retirado del proyecto (por lo que sabemos, hasta podía haber muerto), o que la causa fuera la última de las numerosas guerras con Francia, pero lo cierto es que dejó a Halley desocupado, de lo cual se aprovechó Newton. Este, como custodio de la Casa de la Moneda, estaba supervisando la reforma monetaria y nombró a Halley controlador adjunto de la Casa de la Moneda en Chester. La intención de este nombramiento era obviamente concederle un favor, pero a Halley este trabajo le resultó tedioso, aunque aguantó hasta el final, es decir, hasta que la reforma de la moneda estuvo concluida en 1698.

Entretanto, aunque la reina María había muerto, había aumentado, en todo caso, el entusiasmo oficial por aquel viaje «para realizar descubrimientos» y el barco iba a zarpar como navío de la Armada Real, bajo el patrocinio de Guillermo III, transportando cañones y una tripulación de la Armada. Sin embargo, lo que no había cambiado era que Halley iba a estar al cargo de la expedición y, para ello, fue nombrado patrón y comandante de la Armada Real (el rango inmediatamente inferior al de capitán), y se le dio el mando del barco (con título de capitán honorario). Es el único caso de un hombre al que, sin ser marinero, se le haya dado nunca un grado de oficial para actuar como si fuera realmente capitán de un barco de la Armada Real. Aunque en la larga historia de la Armada ha habido unos pocos casos de personas (entre ellas también científicos) a las que se les ha dado temporalmente el grado de oficial, ya sea para tareas administrativas o como nombramiento honorífico, ninguna de estas personas ha llegado a estar realmente al mando de un navío.[1] El 15 de octubre, Halley recibió instrucciones detalladas para aquel viaje que iba a durar un año, aunque no tuvo sorpresas, ya que era él quien las había redactado y presentado al Ministerio de Marina. Antes de zarpar, tuvo ocasión de conocer al zar Pedro el Grande, que entonces aún no había cumplido los treinta años de edad y estaba visitando Inglaterra para aprender técnicas de construcción naval.

Pedro el Grande era un estudiante «participativo» que aprendió a construir barcos trabajando en los astilleros de Deptford. Se alojó en la casa de John Evelyn, dejándola casi destrozada con su fiestas salvajes. Halley cenó con él allí en más de una ocasión y es posible que participara en el juego favorito de Pedro: lanzar a las personas a toda velocidad en una carretilla a través de los setos ornamentales. Cuando Pedro el Grande se marchó, el erario público tuvo que pagar a Evelyn más de 300 libras esterlinas por el coste de reparar los destrozos —la

mitad de lo que le costó al rey enviar al *Paramore* a un viaje de un año de duración al Atlántico Sur.

La historia de aquel viaje, que comenzó el 20 de octubre de 1698, llenaría por sí sola un libro. El primer lugarteniente de Halley, Edward Harrison,[2] un oficial de carrera de la Armada, se ofendió, comprensiblemente, aunque fuera inexcusable, al ver que le colocaban bajo el mando de un hombre que no había sido nunca marinero y tenía cerca de cuarenta y dos años. En la primavera de 1699, cuando el navío estaba en las Indias Occidentales, la situación llegó hasta tal punto que Harrison se retiró a su camarote y dejó solo a Halley para que gobernara por su cuenta el barco, esperando obviamente que el capitán hiciera el ridículo. Pero Halley no hizo el ridículo en absoluto, sino que con gran aplomo llevó el navío de vuelta a Inglaterra, donde llegó el 28 de junio. Después de ocuparse de ciertos asuntos de negocios y de dimitir de su empleo como secretario de la Royal Society, volvió de nuevo al mar, el 16 de septiembre, sin Harrison, y llevó a cabo observaciones relacionadas con el magnetismo durante todo el trayecto hasta llegar a los 52º de latitud en el hemisferio sur (casi a la misma altura que el extremo sur del continente americano), regresando triunfal a Plymouth el 27 de agosto de 1700.

Aunque se le restituyó su puesto como miembro de la Royal Society, Halley no había acabado con la armada ni con los asuntos del gobierno. En 1701, se embarcó en el *Paramore* con la intención de estudiar las mareas en el canal de la Mancha, pero, según se sospecha actualmente, con una agenda secreta en la que figuraba la realización de una inspección clandestina de los accesos a los puertos franceses y también el espionaje de las defensas portuarias. En 1702, cuando la reina Ana ocupaba ya el trono, Halley fue enviado a cumplir una misión en Austria, evidentemente para asesorar sobre fortificaciones portuarias en el Adriático (el Imperio Austríaco se extendía entonces

hasta allí por el sur). Parece ser que en este viaje y en otro posterior Halley realizó de paso alguna pequeña tarea de espionaje (en enero de 1704 cobró de los fondos del Estado para servicios secretos una modesta cantidad de dinero por unos servicios que se tuvo sumo cuidado en no detallar) y además, durante el segundo viaje, cenó en Hannover con el futuro Jorge I y su heredero.

Halley predice el retorno de un cometa

Justo antes de que Halley regresara de su segunda misión diplomática, falleció el catedrático *saviliano* de geometría de Oxford. En esta ocasión, teniendo a sus amigos situados en altos cargos y con un expediente de servicios a la Corona, nadie dudaba de que Halley sería el sucesor —incluso a pesar de que Flamsteed objetara que Halley «ahora habla, jura y bebe brandy como un capitán de la Marina». Después de todo, «era» un capitán de la Marina y le encantaba que en Oxford le llamaran capitán Halley, al menos hasta 1710, cuando, con bastante retraso, se convirtió en el doctor Halley.

Fue nombrado para la cátedra *saviliana* en 1704 y, un año más tarde, cuando ya había perdido toda esperanza de conseguir más datos precisos de Flamsteed, publicó su libro a *Synopsis of the Astronomy of Comets*, la obra que ha contribuido más a que Halley sea recordado. En ella predecía que el cometa de 1682 regresaría «hacia el año 1758», cumpliendo así las leyes de Newton. Aunque Halley siguió desarrollando una gran actividad científica después de 1705, hay una obra que destaca por encima de todos sus últimos trabajos. Dicha obra se generó a partir de su vuelta al tema que le había dado renombre por primera vez: el estudio de las posiciones de las estrellas.

Durante todo el tiempo transcurrido desde la primera expedición de Halley a Santa Elena, mientras su carrera sufría todas la vueltas y revueltas que ya hemos mencionado, Flamsteed había estado trabajando muy activamente en los cometidos para los cuales se había creado el Real Observatorio de Greenwich —preparar tablas astronómicas más precisas que sirvieran de ayuda para la navegación—. Sin embargo, no se había publicado prácticamente nada, ya que Flamsteed denunció que, debido a que la Corona sólo le había pagado una cantidad simbólica y él había tenido que aportar todos sus instrumentos propios, aunque ya tenía datos, los retendría todo el tiempo que a él le pareciera oportuno.[3] En 1704, Newton, como presidente de la Royal Society, convenció a Flamsteed para que entregara algunas de sus mediciones y así se puso en marcha la impresión de un nuevo catálogo de estrellas. Sin embargo, la publicación quedó suspendida ante las objeciones de Flamsteed y su afirmación de ser el propietario de los datos.

La única forma en que pudo resolverse esta situación fue a través de la autoridad de la Corona, en 1710, cuando la reina Ana promulgó un decreto en el que se nombraba a Newton, y a los miembros de la Royal Society que él designara, para actuar como Consejo de Inspectores del observatorio, con autoridad para exigir todos los datos que Flamsteed tuviera en aquel momento y para que éste les entregara los resultados anuales en un plazo de seis meses a partir del final de cada año.[4] Ni siquiera Flamsteed podía oponerse a las órdenes de la reina. Halley fue designado como la persona encargada de poner en orden todos los materiales y el resultado fue que en 1712 se publicó la primera versión del catálogo de estrellas de Flamsteed. Las discusiones no terminaron aquí y, finalmente, en 1725,

apareció una versión definitiva, que fue publicada por su viuda después de la muerte de Flamsteed. En este catálogo figuraban alrededor de 3000 posiciones de estrellas con una precisión de 10 segundos de arco y fue, desde luego, el mejor catálogo de este tipo publicado hasta entonces, un libro que cualquier persona normal habría estado orgullosa de ver impreso estando todavía en vida.

Sin embargo, mucho antes de aquel momento, Halley tuvo ocasión de trabajar con los primeros materiales de Flamsteed y comparó las posiciones de estrellas que éste daba con las que figuraban en un catálogo mucho más limitado que había realizado Hiparco en el siglo II a. C. Halley descubrió que, aunque la mayoría de las posiciones de estrellas que habían obtenido los griegos encajaban muy de cerca con las posiciones más precisas halladas por Flamsteed, en unos pocos casos las de Flamsteed eran tan diferentes de las que se habían medido unos 2000 años antes, que era imposible considerarlas equivocaciones de los antiguos, especialmente porque estaba claro que las otras posiciones eran correctas, dentro de los márgenes de error que se podían derivar de las técnicas utilizadas por los griegos. Arturo, por ejemplo, una estrella brillante y fácil de observar, se veía en el siglo XVIII a una distancia de la posición dada por los griegos que era el doble de la anchura de la luna llena (más de un grado de arco). La única conclusión posible era que, desde la época de Hiparco, estas estrellas hubieran estado desplazándose físicamente a través del cielo. Esto terminó de arruinar la teoría de la esfera de cristal, siendo la primera prueba directa derivada de una observación mediante la cual se demostraba el error de considerar a las estrellas como pequeñas luces pegadas a una esfera que sería tan sólo un poco mayor que la órbita de Saturno (recordemos que Urano y Neptuno aún no se habían descubierto). La demostración de que las estrellas realizan un movimiento relativo unas con respecto a las otras, es también

una prueba de que las estrellas se encuentran a diferentes distancias con respecto a nosotros, repartidas en tres dimensiones por todo el espacio. Esto da credibilidad a la idea de que las estrellas son otros soles que, por estar situados a unas distancias tan enormes de nuestro planeta, aparecen ante nuestros ojos como diminutos puntos de luz, pero tendrían que transcurrir aún más de cien años antes de que se realizara directamente la medición de las distancias a las que se encuentran las estrellas más cercanas a nosotros.

Muerte de Halley

Cuando Flamsteed murió, en 1719, Halley, que tenía ya 63 años, le sucedió en el cargo de astrónomo real, siendo nombrado oficialmente el 9 de febrero de 1720. Después de reemplazar (esta vez utilizando fondos oficiales) los instrumentos que Flamsteed había comprado y su viuda se había llevado, Halley llevó a cabo, a su avanzada edad, todo un programa de observaciones, incluido (por fin, pero demasiado tarde para resolver el problema de la navegación, porque habían aparecido ya los cronómetros portátiles) un ciclo completo de 18 años de movimientos lunares. Su vejez se vio aliviada porque, siendo un antiguo oficial de la Marina con más de tres años de servicio, recibía una pensión equivalente a la mitad del salario que había percibido en la Armada. Aunque su esposa falleció en 1736, y él mismo sufrió por aquella época un ligero ataque de apoplejía, Halley continuó realizando observaciones hasta poco antes de su muerte, el 14 de enero de 1742, poco después de cumplir 85 años. No obstante, incluso después de que Halley falleciera, dos de sus observaciones más importantes quedaron pendientes para que otros las llevaran a cabo.

El objeto espacial que actualmente se conoce como cometa de Halley reapareció tal como se había predicho, y se vio de

nuevo a partir del día de Navidad de 1758, aunque ahora los astrónomos sitúan la fecha de paso del cometa considerando el momento en que su acercamiento al Sol fue máximo, es decir, el 13 de abril de 1759. Este fenómeno constituyó una justificación triunfal de la teoría de la gravedad y de las leyes de la mecánica de Newton, enunciadas en los *Principia*, y selló el éxito de Newton de la misma manera que, sólo 160 años más tarde, las observaciones de un eclipse total de Sol pondrían el sello en la teoría general de la relatividad de Albert Einstein. En 1761, y también en 1769, los tránsitos de Venus predichos por Halley se observaron desde más de sesenta estaciones de observación de todo el mundo y, de hecho, las técnicas que este astrónomo había desarrollado medio siglo atrás se utilizaron para calcular la distancia de la Tierra al Sol, dando como resultado una cantidad equivalente a 153 millones de kilómetros, que se aproxima asombrosamente al resultado de la mejor medición moderna: 149,6 millones de kilómetros. Así pues, Halley hizo su mayor contribución a la ciencia 27 años después de su muerte, 91 años después de su primera irrupción en la escena de la astronomía con su *Catalogue of the Southern Stars* y 113 años después de su fecha de nacimiento —lo que será, seguramente, uno de los períodos más largos de logros «activos» que se recuerden en la historia—. Su legado al dejar el mundo fue poner la situación a punto para que se llegara a comprender la auténtica inmensidad del espacio y el tiempo, que se había deducido de los estudios del universo físico, pero que pronto llegaría a ser de vital importancia, especialmente en el caso del tiempo, para comprender los orígenes de la diversidad de las especies existentes en el mundo vivo.

Erasmus Darwin, que tiene un lugar por derecho propio en la historia de la evolución, no sólo por haber sido el abuelo de Charles Darwin, nació en 1731, cuando Halley estaba todavía en plena actividad como astrónomo real y sólo hacía cuatro

años de la muerte de Newton. Sin embargo, si queremos preparar el escenario adecuadamente para hablar de la evolución, necesitamos remontamos al siglo XVII para comenzar convenientemente la historia, por ejemplo, con la obra de Francis Willughby, el naturalista cuyo libro sobre los peces dejó a la Royal Society en una situación financiera tan desesperada que Halley tuvo que pagar de su bolsillo la publicación de los *Principia*.

JOHN RAY Y FRANCIS WILLUGHBY: ESTUDIO DIRECTO DE LA FLORA Y LA FAUNA

Sin embargo, vale la pena mencionar dos peculiaridades relativas al libro de Willughby. En primer lugar, Willughby llevaba ya catorce años muerto cuando se publicó el libro en 1686, y la segunda es que no lo escribió él. La razón por la cual el libro llegó a publicarse, y además con el nombre de Willughby, fue que trabajó en colaboración con el naturalista más importante del siglo XVII, John Ray, que hizo más que ningún otro para establecer los fundamentos del estudio científico del mundo natural. A veces se ha considerado a Ray como el equivalente biológico de Newton, por poner en orden el mundo natural de la misma forma que lo hizo Newton con el mundo físico; pero su posición realmente se parece más a la de Tycho Brahe, ya que realizó observaciones que otros utilizarían posteriormente como base para sus teorías y para los modelos relativos al funcionamiento del mundo biológico.[5] El verdadero lugar de Willughby dentro de la historia es el de amigo, patrocinador y compañero de trabajo de Ray, y la forma correcta de comenzar el relato es hablando del propio Ray, que nació en un pueblo llamado Black Notley, en Essex, el 29 de noviembre de 1627. Fue uno de los tres hijos del herrero del pueblo, Roger Ray, que no era rico, pero era un miembro importante de la comunidad local; su madre, Elizabeth, era hija de un herborista y curandero,

que utilizaba plantas para curar a los del pueblo cuando estaban enfermos. Aunque su apellido aparece en los registros parroquiales en distintas formas, como Ray, Raye y Wray, sin embargo John era conocido como Wray en el momento en que ingresó en la Universidad de Cambridge, hasta que en 1670 lo cambió a Ray —puede ser que la *W* se añadiera por equivocación cuando se matriculó en la universidad y que en aquella época John fuera demasiado tímido para indicar el error.

El hecho de que consiguiera entrar en Cambridge recuerda en cierto modo la historia de Newton en sus años jóvenes, aunque en este caso no exista el trauma de ser separado de la madre, ni el de la muerte del padre. Era, sin lugar a dudas, un muchacho brillante capaz de aprender mucho más que lo que le podían enseñar en la escuela del pueblo y, según parece, se benefició del interés que mostraron por sus habilidades dos párrocos de Black Notley —Thomas Goad, que falleció en 1638, y su sucesor Joseph Plume, un licenciado por Cambridge que fue probablemente el responsable de que se enviara a Ray a estudiar a la escuela secundaria de Braintree—. Lo que esta escuela enseñaba era poca cosa, salvo en lo referente a las lenguas clásicas, y Ray recibió una enseñanza básica del latín tan rica que luego escribió casi toda su obra científica en esta lengua —en muchos aspectos tenía más fluidez en latín que en inglés. Además, cuando estaba en Braintree, se fijó en Ray otro clérigo, el vicario de Braintree,[6] que se había licenciado en el Trinity College. Fue gracias a este vicario que Ray pudo ir a Cambridge en 1644, cuando tenía 16 años y medio de edad.

La familia de Ray no hubiera podido pagar en modo alguno una educación universitaria y esta circunstancia parece haber sido la causa de ciertos problemas. El 12 de mayo de 1644, Ray fue admitido formalmente en el Trinity College como becario pobre o sub-becario, con un subsidio otorgado a cambio de trabajar como criado, según parece con la promesa de recibir

una beca normal de algún tipo, que Samuel Collins le ayudaría a conseguir. Sin embargo, esto no fue posible, por lo que fue necesario mover algunos resortes y el resultado fue que Ray se trasladó al Catherine Hall el 28 de junio. La razón de este traslado fue que los resortes que pudo mover el vicario de Braintree estaban vinculados con un legado en beneficio del titular de aquella plaza, que la dotaba con la manutención para «becarios prometedores y pobres que estudiaran en la Universidad de Cambridge, concretamente en Catherine Hall y el Emmanuel College». En el Trinity College, Ray había sido admitido como «Ray, John, sub-becario»; en Catherine Hall la admisión decía «Wray, un becario».[*] Probablemente, con la suerte que había tenido se sentía tan aliviado que no se preocupó por la ortografía de su apellido.

Aquellos no fueron tiempos fáciles en Cambridge, ya que era la época de la guerra civil y sus conflictos asociados. La región estaba por completo en manos de la facción parlamentaria (los puritanos), por lo que los realistas, e incluso los antirrealistas que no eran suficientemente puritanos, corrían el riesgo de ser expulsados de los cargos que ocupaban en la universidad. Esto le sucedió al director del Catherine Hall en 1645 y, en parte como resultado de los alborotos que esto ocasionó, pero también porque Catherine Hall era uno de los centros académicos menos brillantes de la época, Ray se trasladó al Trinity College como sub-becario en 1646 —para entonces era ya muy conocido como estudiante destacado, por lo que fue bien recibido en el Trinity College—. Allí entabló amistad con Isaac Barrow (el futuro catedrático lucasiano), un condiscípulo que también se había trasladado al Trinity (desde Peterhouse) después de la expulsión del director de su antiguo *college*. Barrow era un monárquico (razón por la cual no empezó a destacar en Cambridge hasta que se produjo la Restauración) y Ray era un puri-

tano, pero ambos se hicieron buenos amigos y compartieron un conjunto de habitaciones.

Sin embargo, aunque Ray tenía inclinaciones puritanas, no seguía ciegamente la línea oficial de la facción parlamentaria, lo cual más tarde afectaría seriamente a su vida. Uno de los signos externos de la conformidad con los puritanos consistía en suscribir un conjunto de ideas que constituían lo que se llamaba el Covenant,[*] que era el distintivo del presbiterianismo. El Covenant original, firmado por los eclesiásticos escoceses en 1638, se oponía a los intentos de Carlos I y de William Laúd, entonces arzobispo de Canterbury, de imponer las prácticas de la Iglesia de Inglaterra, que en Escocia estaban consideradas como demasiado próximas al catolicismo, y afirmaba (o reafirmaba) la fe reformada y los principios presbiterianos de la Iglesia de Escocia. La aceptación del Covenant era la condición principal puesta por los escoceses para apoyar al Parlamento durante la primera fase de la guerra civil inglesa, junto con una promesa de que el Parlamento reformaría la Iglesia de Inglaterra siguiendo la línea presbiteriana (de acuerdo con el Covenant), lo cual significaba, entre otras cosas, la abolición de los obispados.[7] Muchas personas suscribieron formalmente el Covenant por motivos auténticamente religiosos; muchos otros lo hicieron como una cuestión de formas, con el fin de evitarse conflictos con la autoridad. Algunos, como Ray, nunca se comprometieron formalmente, aunque simpatizaran con la causa puritana. Hubo otros, como Barrow, que se negaron a suscribirlo por una cuestión de principios, aunque esta negativa pudiera arruinar las perspectivas de futuro en lo referente a su carrera.

En el caso de Ray, la primera consecuencia personal de estas reformas fue que, aunque se graduó en 1648 y al año siguiente se convirtió en miembro de la Junta de Gobierno del Trinity College (el mismo día en que Barrow fue elegido para un cargo similar), nunca tomó las órdenes sagradas. Como otras institu-

ciones, el Trinity College sostenía la opinión de que, si no hubiera obispos, no habría modo legal para ordenar a nadie, con lo que el requerimiento quedaría sin efecto —sin embargo, Ray siempre tuvo intención de ordenarse y dedicar su vida a las tareas eclesiásticas—. Durante aproximadamente los doce años siguientes, Ray ocupó toda una serie de puestos docentes, como profesor de griego, de matemáticas y de humanidades, y asimismo trabajó en varios empleos administrativos dentro del *college*. Así, consiguió tener una posición económica suficientemente segura, de tal manera que, cuando su padre falleció en 1655, Ray pudo construir una casa modesta para su madre en Black Notley y tuvo medios para ayudarla en su viudedad (parece ser que sus hermanos murieron todos ellos siendo aún jóvenes). Los resultados de ésta y de otras expediciones similares por el país, en las que participó acompañad o por otros colegas, se publicaron finalmente como English Catalogue en 1670. Simultáneamente con sus tareas en el *college* y haciendo uso de la libertad que tenían sus miembros para estudiar lo que desearan, Ray comenzó a dedicar su atención a la botánica. Fascinado por las diferencias existentes entre las plantas y al no encontrar a nadie que pudiera enseñarle cómo identificar las diversas variedades, comenzó a realizar su propio esquema de clasificación, aceptando la ayuda de cualquier estudiante que quisiera unirse a él en esta tarea. Aquí es donde Willughby entra en escena.

Francis Willughby tenía sus orígenes en un ambiente muy distinto del de John Ray. Había nacido en 1635, siendo hijo de un miembro poco importante de la aristocracia, sir Francis Willughby de Middleton Hall, en Warwickshire; su madre era hija del primer conde de Londonderry, y el dinero nunca sería un problema para el joven Francis. Estando libre de preocupaciones financieras y dotado de una mente aguda y un gran interés por el mundo natural, Willughby se convirtió en uno de los tí-

picos científicos aficionados de origen aristócrata y bien relacionados que existieron en aquella época. De hecho, llegaría a ser uno de los miembros fundadores de la Royal Society a la edad de 25 años. Llegó a Cambridge en 1652 y pronto entró a formar parte del círculo de naturalistas que rodeaban a Ray, convirtiéndose además en su fiel amigo, aunque era bastante más joven que él. Los primeros frutos del interés de Ray por las plantas se hicieron públicos en 1660 (un año después de que Willughby consiguiera su doctorado), con la publicación de su *Cambridge Catalogue*,[8] en el que se describe la vida de las plantas de la región en la que se encontraba la universidad. Parecía que el destino de Willughby era hacer carrera como distinguido académico de Cambridge, pero todo cambió con la Restauración.

La situación ya había empezado a cambiar en 1658, cuando las autoridades del Trinity College decidieron que, a pesar de todo, sus miembros tenían que tomar las órdenes sagradas. Ray lo evitó con toda suerte de pretextos, incluso cuando le ofrecieron el puesto de Cheadle en 1659. Consideraba inmoral formular los votos simplemente como una cuestión de formas y deseaba tomarse un tiempo para decidir en conciencia si realmente quería comprometerse a servir a Dios del modo que implicaban dichos votos. Durante el verano de 1660, en la época de la Restauración, Ray, todavía indeciso, viajó al norte de Inglaterra y a Escocia con Willughby, para estudiar la flora y la fauna.[9] A su regreso a Cambridge, se encontró con que muchos de sus colegas puritanos habían sido expulsados y reemplazados por realistas, y que los antiguos rituales eclesiásticos que él desdeñaba, como desdeñaba toda forma carente de sustancia, habían sido reinstaurados, al igual que los obispos. Temiéndose que perdería él también su plaza en Cambridge, prefirió seguir ausente, pero el *college* le urgió a volver, ya que estaba considerado como un miembro valioso del mismo —y, des-

pués de todo, Ray nunca había sido un *covenanter* comprometido—. Convencido de que realmente su lugar estaba en la universidad, regresó y cumplió con el requisito de la ordenación, siendo admitido en el clero por el obispo de Lincoln antes de que finalizara aquel año. En 1661, rechazó la oferta de un puesto bien pagado en Kirkby Lonsdale, porque prefería hacer carrera dentro de la universidad.

A partir de entonces, todo fue sobre ruedas. Aunque Carlos I había jurado lealtad al Covenant por conveniencia política durante la guerra civil, su hijo no tenía intención alguna de permanecer fiel a este juramento, una vez que hubo accedido al poder. Tampoco vio razón alguna para que otros tuvieran que sentirse vinculados por tal juramento y, en 1662, se aprobó la Ley de Uniformidad, que exigía a todos los clérigos, y a todos aquellos que tuvieran una plaza en la universidad, una declaración de que el juramento por el cual se había aceptado el Covenant era ilegal y que nadie que lo hubiera pronunciado estaba obligado por dicho juramento. La mayoría pasaron por los trámites de manifestar su acuerdo con la Ley de Uniformidad, pero Ray era una persona que se tomaba muy en serio los juramentos, por lo que no podía aceptar que el rey o cualquier otro tuviera ningún derecho a anularlos de esta manera. Aunque él no había suscrito el Covenant, se negó a declarar formalmente que aquellos que lo habían hecho estuvieran equivocados y que sus juramentos fueran ilegales y no vinculantes. Ray fue el único miembro del Trinity College que se negó a obedecer las instrucciones del rey, y uno de los doce que se negaron en toda la universidad (recordemos que los covenanters intransigentes ya habían sido expulsados en 1660). El 24 de agosto dimitió de todos sus cargos y se convirtió en un clérigo desempleado. Siendo sacerdote, no podía aceptar un empleo para seglares, aunque tampoco podía ejercer como sacerdote a causa de su disidencia. Regresó a la casa de su madre en Black Notley, sin empleo y sin

perspectivas, pero entonces fue su amigo Willughby quien le salvó de una vida de oscura pobreza.

En 1662, Ray, Willughby y Philip Skippon, un antiguo alumno de Ray, habían realizado otra larga expedición de campo, esta vez en el oeste de Inglaterra, estudiando la flora y la fauna tal como existían en la naturaleza. Fueron pioneros con la idea de que el conocimiento de primera mano del entorno y el hábitat de las especies vivas era esencial para comprender su forma física y su modo de vida, y que cualquier esquema de clasificación debe tener en cuenta el comportamiento observado en el campo y no basarse por completo en los especímenes conservados en los museos. Fue durante este viaje cuando decidieron que, puesto que Ray no tenía otras obligaciones, harían un largo viaje a la Europa continental, donde Willughby estudiaría los pájaros, los mamíferos, los peces y los insectos (en aquellos tiempos la palabra *insecto* hacía referencia a cualquier animal que no fuese un pájaro, un mamífero o un pez), mientras que Ray se concentraría en la vida de las plantas. El grupo, al que se sumó Nathaniel Bacon, otro miembro del Trinity College, zarpó de Dover en abril de 1663. Los gastos de Ray los pagaron, por supuesto, sus compañeros. Viajaron por el norte de Francia, Bélgica, Holanda, varias zonas de Alemania, Suiza, Austria e Italia, hasta que Willughby y Bacon dejaron a los demás y volvieron a su país en 1664. Willughby ofreció a la Royal Society en 1665 un informe de la primera parte de la expedición. Entretanto, Ray y Skippon visitaron Malta y Sicilia, viajaron por el centro de Italia, permanecieron cierto tiempo en Roma (donde Ray realizó varias observaciones astronómicas de un cometa, que luego fueron publicadas por la Royal Society), y luego regresaron a Inglaterra pasando por el norte de Italia, Suiza y Francia, llegando a su país en la primavera de 1666. Ray y Skippon realizaron informes detallados sobre sus viajes y sobre los países que habían visitado, pero su objetivo principal

fue estudiar el mundo de los seres vivos, y este viaje aportó gran parte del material que Ray utilizaría después en sus grandes obras y le daría una fama duradera. Se ha dicho que el viaje a Europa fue para Ray el equivalente al viaje del *Beagle* para Charles Darwin y, al igual que éste, Ray tardó muchos años en poner en orden sus datos y sus especímenes, y en sacar sus conclusiones. Pero valió la pena esperar.

Cuando Ray regresó a Inglaterra, tenía ya una imagen mental completa del mundo de los seres vivos y disponía de un enorme número de especímenes, esbozos y otras observaciones que habían recopilado él mismo y sus compañeros. Fue una época fértil para la ciencia en Inglaterra, coincidiendo con el primer florecimiento de la Royal Society, y entre las cosas de las que Ray tuvo que ponerse al corriente (cosa que hizo con gran voracidad) estaban la *Micrographia* de Hooke y las primeras obras de Boyle. Sin embargo, no tenía una base en la que apoyarse para organizar sus materiales y sus teorías. Durante los meses siguientes estuvo con varios amigos, pasando el invierno de 1666-1667 con Willughby en Middleton Hall (donde Willughby era entonces el cabeza de familia, ya que sir Francis había muerto), poniendo en orden de alguna manera sus colecciones. Esta relación fue desarrollándose gradualmente hasta llegar a ser permanente. Ray y Willughby viajaron de nuevo al oeste de Inglaterra en el verano de 1667, y Ray participó en otras expediciones durante los años siguientes, pero se convirtió en el capellán privado de Willughby en Middleton Hall, formalizando así su posición en la casa. A finales de 1667, fue elegido también miembro de la Royal Society, pero en reconocimiento de sus circunstancias especiales quedó eximido del pago de la suscripción.

A los 40 años de edad, Ray parecía haber encontrado un nicho seguro donde vivir (después de todo, Willughby era ocho años más joven que él) con grandes posibilidades de organizar

la gran cantidad de materiales que había recopilado y publicado con Willughby, una serie de libros que ofrecían todo un catálogo del mundo de los seres vivos. En 1668, Willughby se casó con una rica heredera, Emma Barnard, y, al igual que otras muchas parejas de aquella época, tuvieron rápidamente unos cuantos hijos: Francis, Cassandra y Thomas, el cual, tras la muerte de su hermano mayor a la edad de 19 años, heredó las propiedades y posteriormente fue nombrado lord Middleton por la reina Ana. Pero, en 1669, durante una visita realizada a Chester en compañía de Ray, Willughby cayó enfermo con fiebre muy alta. Su salud continuó siendo débil hasta bien entrado el año 1670; en 1671, parecía que había vuelto a ser el de siempre, pero en 1672 volvió a enfermar gravemente y falleció el 3 de julio, a los 37 años de edad. Ray era uno de los cinco albaceas del testamento de Willughby, que le dejó una renta anual de 60 libras esterlinas y le encomendó la responsabilidad de la educación de sus dos hijos varones (se suponía que las niñas no necesitaban educación). Ray asumió esta responsabilidad seriamente y no volvió a tomar parte en más expediciones, instalándose permanentemente en Middleton Hall y dedicándose a poner por escrito los resultados de los trabajos que había realizado anteriormente junto con Willughby.

Su posición no era tan cómoda como podría parecer, ya que la viuda de Willughby no se llevaba muy bien con Ray y le trataba más como a un sirviente que como al amigo de su difunto marido. Al principio, la tensión que esto producía se vio amortiguada por la influencia de la madre de Willughby, lady Cassandra, que estaba mucho mejor predispuesta con respecto a Ray. Pero cuando esta dama murió, en 1675, Emma Willughby pudo actuar libremente y no tardó en casarse con un puritano estricto, un hombre extraordinariamente rico al que Ray describió como «sórdidamente codicioso». Su situación en Middleton Hall llegó a ser imposible y tuvo que marcharse. Seguía

disponiendo de la renta anual de 60 libras esterlinas que le había dejado Willughby, pero en un futuro inmediato se quedó sin acceso a las colecciones de Willughby que estaban en Middleton Hall y no le resultó fácil completar el programa de publicaciones que tenía planeado.

Quizá porque ya tenía la vista puesta en su futuro, Ray había hecho que sus circunstancias personales cambiaran en 1673, al casarse con una muchacha del personal doméstico de Middleton, Margaret Oakley —no una sirvienta, sino una dama que de alguna manera era responsable de los niños, quizás una institutriz o aya—. Era veinticuatro años más joven que él y está claro que la relación fue más un arreglo práctico que una cuestión de amor (como el segundo matrimonio de la madre de Isaac Newton), pero, según parece, fue un matrimonio feliz, aunque no tuvieron hijos hasta que, cuando Ray tenía ya 55 años, Margaret dio a luz un par de gemelas, a las que siguieron pronto otras dos niñas más.

Después de ser expulsado de Middleton Hall, el matrimonio Ray vivió primero en Sutton Coldfield y luego cerca de Black Notley, hasta que en 1679 falleció la madre de Ray y ocuparon la casa que él le había proporcionado anteriormente, viviendo de las 60 libras anuales más otras 40 libras que eran la renta anual que obtenían de algún terreno que poseían en las proximidades (no sabemos exactamente cómo llegó ese terreno a ser propiedad de la familia). Era justo lo suficiente para el mantenimiento de la pareja y sus hijas, y daba a Ray —que en lo sucesivo rechazó varias ofertas de trabajo durante varios años— la libertad necesaria para pasar el siguiente cuarto de siglo trabajando ininterrumpidamente en lo que le gustaba, de tal modo que puedo completar una serie de libros importantes que ponían orden en el mundo de la biología. Mencionaremos únicamente los títulos más importantes, aunque Ray escribió muchos otros, incluso libros de lengua y dialectos ingleses.

Ray siempre pensó, con su genuina modestia, que sin la ayuda intelectual y financiera de Willughby no conseguiría hacer nada, y su máxima prioridad fue conseguir imprimir los libros sobre pájaros y peces de los que, según su reparto amistoso del mundo de los seres vivos, Willughby habría sido también responsable, si hubiera vivido para publicarlos. El libro sobre los pájaros estaba prácticamente terminado en la época en que Ray tuvo que marcharse de Middleton Hall, pero se editó en 1677 con el título *Ornithologia* y en él figuraba Francis Willughby como autor. Aunque Ray también había realizado una gran cantidad de trabajos sobre los peces, tanto por cuenta propia, como con Willughby, en 1675 quedaba aún mucho por hacer sobre este tema, y fue en 1679, después de establecerse en Black Notley, cuando por fin pudo Volver a trabajar sobre este proyecto y lo terminó, a pesar de las dificultades que tenía para acceder a los materiales que se encontraban en Middleton Hall. El libro titulado *Ornithologia* podría considerarse en realidad como una obra conjunta de Ray y Willughby, pero la *History of Fishes*, en cambio, debe muy poco a Willughby (salvo la recogida de materiales) y debería considerarse realmente como un libro de Ray. A pesar de esto, *History of Fishes* se publicó en 1686 con el nombre de Francis Willughby como autor, en una edición espléndidamente ilustrada que costó 400 libras esterlinas a la Royal Society.

En los momentos libres que le quedaban cuando estaba trabajando en nombre de Willughby sobre el mundo de los seres vivos, Ray se había dedicado también a su antigua disciplina favorita, la botánica, y el primer volumen de su inmensa *Historia generalis plantamm* se publicó también en 1686, apareciendo posteriormente el segundo volumen en 1688 y un tercero en 1704. El libro abarcaba más de 18 000 plantas, clasificándolas según las familias a las que pertenecían, y también con arreglo a su morfología, su distribución y su hábitat. Asimismo, se ha-

cía una relación de sus aplicaciones farmacológicas y se describía las características generales de la vida de las plantas, como por ejemplo el proceso de germinación de las semillas. Lo más importante era que Ray estableció la especie como unidad básica de la taxonomía —fue Ray quien definió el verdadero concepto de especie en el sentido moderno del término, de tal modo que, en palabras del propio Ray, los miembros de una especie «nunca nacen de la semilla de otra especie»—. En un lenguaje más bíblico, los perros engendran perros, los gatos engendran gatos, y así en todos los casos; por consiguiente, los perros y los gatos son especies distintas.

Ray falleció al año siguiente de la publicación del tercer volumen de *Historia generalis plantamm,* el 17 de enero de 1705, a los 77 años de edad. Dejó sin publicar un borrador, que aún no estaba pulido, de su última gran obra *Historia insectorum,* que apareció en una edición póstuma el año 1710. A pesar de la temprana muerte de Willughby, de sus problemas económicos y de las graves enfermedades que padeció durante sus últimos años, y además de dedicarse también a la producción de otras obras, había completado por sí solo la tarea que él y Willughby habían iniciado tantos años atrás: poner en orden el mundo biológico.

Fue Ray, más que ningún otro, quien convirtió el estudio de la botánica y la zoología en un trabajo científico, aportando orden y lógica a la investigación del mundo de los seres vivos a partir del caos que había existido hasta entonces.[10] Inventó un sistema taxonómico claro basado en la fisiología, la morfología y la anatomía, preparando así el camino para el trabajo de otro científico mucho más famoso, Linneo, que se basó en gran medida, y no siempre reconociendo su deuda, en las obras publicadas por Ray con su nombre o con el de Willughby. Aunque era profundamente religioso, también a Ray le resultó difícil conciliar el relato bíblico de la creación con la evidencia que te-

nía ante sus ojos, no sólo por la variedad existente en el mundo de los seres vivos (donde estuvo muy cerca de afirmar que las especies no son inmutables, y que pueden cambiar en el transcurso de varias generaciones), sino también por sus estudios sobre fósiles, siendo uno de los primeros en reconocer dichos objetos como los restos de animales y plantas que vivieron en otros tiempos. Ya en 1661 estuvo realizando anotaciones sobre lo que entonces se llamaba «piedras serpiente» y, durante la década de 1660, continuando los trabajos pioneros de Hooke y Steno (el de este último brevemente), volvió repetidamente a este tema en sus escritos, barajando la idea de que la ausencia de formas vivientes de algunas especies fosilizadas parece implicar la existencia de especies completas que fueron barridas de la faz de la Tierra y luchando contra la teoría (que él rechazaba) de que la presencia de peces fósiles en las rocas de montañas a gran altura implica que esas montañas estuvieron hundidas durante enormes períodos de tiempo.[11] Ya en 1663, estando en Brujas, escribió la descripción de un bosque enterrado que se había encontrado «en lugares que hace 500 años eran mares», diciendo lo siguiente:

> Muchos años antes de que existieran datos sobre su antigüedad, estos lugares eran parte de la tierra firme y estaban cubiertos de bosques; posteriormente, tras ser inundados por la violencia del mar, continuaron mucho tiempo bajo el agua, hasta que los ríos arrastraron tierra y lodo suficientes para cubrir los árboles, llenar las zonas poco profundas y restablecer de nuevo la tierra firme… que en los tiempos remotos el fondo del mar estuviera a tan gran profundidad y que aquel espesor de cientos de pies [o decenas de metros] de tierra se formara a partir de los sedimentos de aquellos grandes ríos que desembocaban en el mar… es una cosa extraña, considerando lo poco que hace que existe el mundo, cuya edad, según la estimación habitual, no llega aún a los 5600 años.[12]

El desconcierto de Ray refleja con exactitud el modo en que los científicos luchaban por comprender la auténtica inmensidad de la duración del tiempo geológico, viendo la evidencia con sus propios ojos, pero sin ser capaces de avenirse a aceptar las implicaciones en un primer momento. Pero, antes de tomar

el hilo de la historia de la geología, deberíamos ver de qué forma la obra de Ray condujo, a través de Linneo, al desarrollo del modo de comprender el mundo de los seres vivos, que fue el precedente esencial para llegar a una teoría de la evolución que resultara convincente.

Carl Linneo y la denominación de las especies

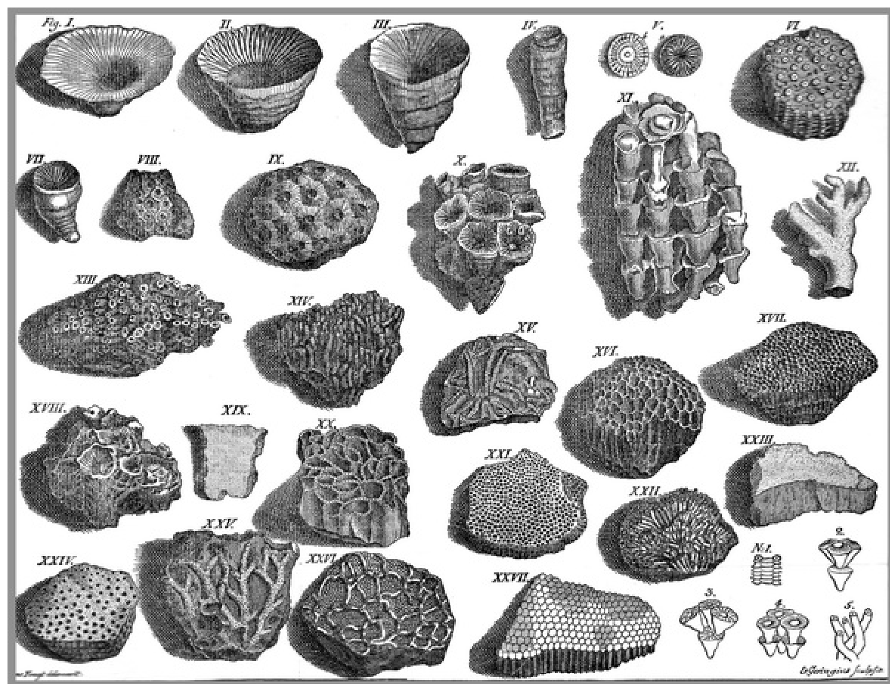
Carl Linneo es el único de los científicos mencionados en este libro que cambió su nombre, pasando de la versión latinizada a una forma en lengua vernácula. Si esto sucedió así, fue sólo porque el apellido ya lo había latinizado su padre, un clérigo conocido inicialmente como Nils Ingemarsson, que se inventó el apellido Linnaeus a propósito de un tilo (*linden tree*) que se encontraba en su finca. La única razón por la que Carl (llamado a veces Carolus), un hombre vanidoso con una opinión exagerada sobre su propia importancia, cambió este nombre espléndido fue que en 1761 se le concedió un título nobiliario (con efecto retroactivo desde 1757) y se convirtió en Carl von Linneo, en sueco, Carl af Linne. Pero en castellano, ha pasado a la posteridad sencillamente como Linneo.[13]

Linneo nació en Ráshult, en el sur de Suecia, el 23 de mayo de 1707. Su familia no era rica e intentó que Linneo siguiera los pasos de su padre, convirtiéndose en clérigo. Sin embargo, demostró tan poco interés o tan escasa aptitud para ello, que su padre estuvo a punto de colocarlo como aprendiz de zapatero, pero entonces intervino uno de los maestros que habían enseñado al niño y sugirió que podría hacer la carrera de medicina. Con las ayudas de varios patrocinadores, Linneo pudo terminar sus estudios de medicina, que había empezado en la Universidad de Lund en 1727 y continuó en Uppsala desde 1728 hasta 1733. Linneo había sentido interés por las plantas en flor desde que era niño y en la universidad sus lecturas de libros de

botánica fueron mucho más allá del programa que se exigía a los estudiantes de medicina. Le interesó especialmente la nueva teoría, formulada en 1717 por el botánico francés Sébastian Vaillant (1669-1722), según la cual las plantas se reproducían sexualmente y que tenían unos elementos macho y hembra que se correspondían con los órganos reproductores de los animales. La novedad y la audacia que implicaba reconocer esto en el siglo XVIII se puede apreciar quizás en el hecho de que el propio Linneo nunca comprendió del todo el papel de los insectos en la polinización, aunque fue uno de los primeros en aceptar y utilizar la teoría de la reproducción sexual de las plantas.

Mientras realizaba sus estudios de medicina, Linneo concibió la idea de utilizar las diferencias entre los órganos reproductores de las plantas de flor como un medio para clasificar y catalogar las plantas. Esta iniciativa resultaba natural en él, ya que era un catalogador obsesivo que hacía listas de todo (el típico coleccionista de sellos). Cuando se convirtió en profesor, sus salidas al campo con los estudiantes para hacer botánica estuvieron organizadas con precisión militar; los estudiantes incluso tenían que vestir ropas especialmente claras, a las que llamaban el «uniforme botánico». Siempre iniciaban la salida a las siete en punto de la mañana, hacían un descanso para el almuerzo a las dos de la tarde y otro breve descanso a las cuatro de la tarde, mientras el profesor realizaba demostraciones exactamente cada media hora. En una carta dirigida a un amigo, Linneo comentaba que era incapaz de «entender algo que no estuviera ordenado sistemáticamente».[14] En muchas personas esto se consideraría una aberración, una manera de ser preocupante en vez de algo de lo que se pudiera estar orgulloso; pero Linneo encontró exactamente el cauce adecuado por el que podía desarrollar este comportamiento anormalmente obsesivo. Pronto le fue reconocido su talento —en Uppsala, a partir de 1730, trabajó conjuntamente con uno de los profesores.

Olaf Rudbeck, llevando a cabo demostraciones en los jardines botánicos de la universidad y, en 1732, la Sociedad de Ciencias de Uppsala le envió a una importante expedición a Laponia para que recogiera muestras de especímenes botánicos e investigara las costumbres locales de lo que entonces era todavía un misterioso país del norte.



19. Una página de *Såsom Naturforskare Och Läkare*, de Carl Linneo, 1746.

En 1734. Linneo emprendió otra expedición botánica, esta vez a la zona central de Suecia, antes de terminar su licenciatura en medicina en la Universidad de Hardewijk, en Holanda, el ario 1735. Entonces se trasladó a la Universidad de Leiden, pero regresó a Suecia en 1738 y se casó con Sara Moraea, hija de un médico, en 1739. Ejerció como médico hasta 1741 en Estocolmo, donde fue nombrado para la cátedra de medicina de Uppsala. En 1742, se cambió a la cátedra de botánica, que ocupó durante el resto de su vida. Falleció en Uppsala el 10 de enero de 1778. A pesar de todos sus defectos, Linneo fue un hom-

bre encantador y un profesor muy bien considerado, siendo muchos los alumnos suyos que se encargaron de divulgar por todas partes sus teorías sobre taxonomía, tanto en vida de Linneo como después de su muerte. Sin embargo, lo que llama más la atención con respecto a estas teorías es que las formuló, de una manera completa en lo esencial, siendo todavía un estudiante, y las público totalmente terminadas, con el título *Systema Naturae*, en 1735, poco después de su llegada a Holanda. Su obra estuvo sometida a numerosas revisiones y ediciones y la innovación por la que se recuerda ahora a Linneo es principalmente el sistema binomial de clasificación que aplicó a todas las especies, con un nombre formado por dos palabras —se explicaba en el primer volumen de la décima edición—, que apareció en 1758 (el año en que regresó el cometa de Halley), después de haber sido presentado en su libro Species Plantarum en 1753. Fue aquella décima edición la que ofrecía una introducción a la biología y definía términos tales como *Mammalia, Primates* y *Homo sapiens*, entre otros.

La idea de dar a las especies nombres de dos palabras no era en sí algo nuevo, puesto que ya existía en descripciones realizadas en lenguas vernáculas que se remontaban a tiempos antiguos; pero lo que Linneo hizo fue convertir esto en un método sistemático de identificación con unas reglas básicas precisas. Pero nada de esto habría tenido tanta importancia sin todo el esfuerzo dedicado a identificar y clasificar especies según sus características —la investigación de campo llevada a cabo por el propio Linneo, sus alumnos y algunos predecesores como Ray—. En sus diversas publicaciones, Linneo aportó las descripciones de unas 7700 especies de plantas y 4400 especies de animales (casi todo lo que era conocido en Europa en aquella época), dando finalmente a todas ellas sus nombres según el sistema binomial. Todo lo que había en el mundo de los seres vivos quedó ordenado por Linneo en una jerarquía de relaciones

de familia, desde las amplias clasificaciones de reino y clase, bajando a través de las subdivisiones de orden y género, hasta la especie en sí misma. Aunque algunos de estos nombres han sufrido modificaciones a lo largo de los años, y algunas especies han sido reclasificadas a la luz de evidencias posteriores, la cuestión es que a partir de la época de Linneo, siempre que un biólogo se ha referido a una especie (por ejemplo, *Canis lupus*, el lobo) sus colegas han sabido con exactitud de qué especie se estaba hablando. Pero, en caso de que no fuera así, han podido consultar todas las particularidades de la especie en cuestión en textos estándar, e incluso ver especímenes de esa especie preservados bajo las bóvedas de los museos de historia natural.[15] La influencia de este sistema se puede ver en el modo en que conserva aún en nuestros días, en el trabajo científico, el último vestigio del latín, que antiguamente fue el lenguaje universal de la ciencia. Cuando las generaciones siguientes de botánicos y zoólogos exploraron el mundo más allá de Europa, las nuevas especies que descubrieron pudieron clasificarse y encajarse asimismo dentro de este sistema de denominación, aportando los materiales básicos a partir de los cuales comenzarían a aclararse en el siglo XIX las relaciones entre las especies y las leyes de la evolución.

Todo el trabajo de catalogación de Linneo se podría despreciar, desde un punto de vista poco caritativo, considerándolo como mero coleccionismo de sellos. Pero hay que pensar que Linneo dio un paso audaz que cambió para siempre la idea que tenían los seres humanos sobre su propio lugar en la naturaleza. Fue el primero que incluyó al «hombre», que era como denominaban al ser humano en aquellos tiempos, en un sistema de clasificación biológica. Le costó cierto tiempo decidir cómo se podía encajar al hombre en el esquema biológico de los seres vivos, y la propia idea de clasificarlo del mismo modo que a los animales era, por supuesto, un tema controvertido en el si-

glo XVIII. La última versión moderna de esta clasificación, yendo más allá del sistema original de Linneo, da nuestra posición exacta en el mundo de los seres vivos de la siguiente manera:

reino	animal
filum [*]	cordado
ubfilum	vertebrado
clase	mamífero
orden	primate
familia	homínido
género	homo
especie	sapiens

CAROLI LINNÆI

Naturæ Curiosorum *Dioscoridis Secundi*

SYSTEMA NATURÆ

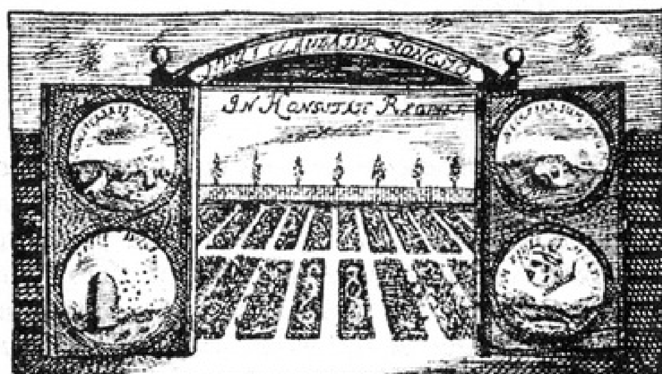
IN QUO

NATURÆ REGNA TRIA,

SECUNDUM

CLASSES, ORDINES, GENERA, SPECIES,

SYSTEMATICE PROPONUNTUR.



Editio Secunda, Auctior.

STOCKHOLMIÆ

Apud GOTTFR. KIESEWETTER.

1740.

[illegible]0. Portada de *Systema Naturae*, 1740

20. Portada de *Systema Naturae*, 1740.

Según el estado actual de las cosas, nuestra especie. *Homo sapiens*, es la única que pertenece a un género en el que sólo hay una especie —el género *Homo* incluye solamente al *Homo sapiens*. Sin embargo, Linneo vio esto de otra manera, y no se le debería acusar de desplazar al *Homo sapiens* demasiado lejos de otros animales, ya que incluyó otras especies de «hombre» en el género *Homo*, basándose en leyendas populares y mitos que hablaban de hombres con rabo, «trogloditas» y otros por el estilo. También le atormentaba la duda de si debería o no existir un género especial para el *Homo*. En el prólogo de su obra *Fauna Svecica*. publicada en 1746, decía: «el hecho es que como experto en historia natural, todavía he de encontrar alguna característica que permita distinguir al hombre del mono, utilizando principios científicos», y en respuesta a las críticas suscitadas por esta postura, en 1747 escribía a su colega Johann Gmelin lo siguiente:

> Le pide a usted y a todo el mundo que me indique una diferencia genérica entre el hombre y el mono, una diferencia que se ajuste a los principios de la historia natural. Desde luego, yo no conozco ninguna… Si yo llamara mono al hombre, o viceversa, conseguiría que todos los teólogos se me echaran encima. Aunque quizás tenga que llegar a hacerlo algún día para ajustarme a las leyes de la ciencia.[16]

En otras palabras, Linneo creía realmente que el hombre pertenecía al mismo género que los monos, una creencia totalmente corroborada por los modernos estudios sobre las similitudes existentes entre el ADN de los humanos, los chimpancés y los gorilas. Si la clasificación se hiciera según las pautas actuales, utilizando las pruebas del ADN, el hombre quedaría clasificado en realidad como un chimpancé —quizás sería el *Pan sapiens*.[*] El hecho de que el *Homo sapiens* se encuentre espléndidamente aislado como único miembro de un género se debe exclusivamente a un accidente histórico y al temor que sentía Linneo ante la posibilidad de provocar la ira de los teólogos.

Linneo era un hombre religioso y ciertamente creía en Dios. Como muchos de sus contemporáneos, se vio a sí mismo un descubridor de la obra divina cuando hacía la clasificación de los seres vivos; en más de una ocasión dijo que el número de especies que existían en la Tierra en su época coincidía con el número de las que había creado Dios al comienzo de los tiempos.[17] Pero esto no impidió que tuviera sus dudas con respecto a la interpretación de la Biblia que se hacía habitualmente en el siglo XVIII, especialmente cuando se planteaba la cuestión de la edad de la Tierra.

Linneo se vio implicado en este debate a causa de una controversia que hizo furor en Suecia durante la década de 1740, después de haberse descubierto que el nivel del agua parecía estar descendiendo en el mar Báltico.[18] Una de las primeras personas que investigó este fenómeno debidamente y que presentó pruebas convincentes de que realmente se estaba produciendo un cambio en el nivel del mar fue Anders Celsius (1701-1744), conocido actualmente por la escala de temperaturas que lleva su nombre. Una de las posibles explicaciones que planteó Celsius para la «disminución de las aguas» se basaba en una teoría expuesta por Newton en el tercer volumen de los *Principia,* según la cual el agua se estaría convirtiendo en materia sólida por la acción de las plantas. Esta teoría decía que las plantas están formadas principalmente por fluidos[19] tomados del entorno y, cuando las plantas se marchitan, forman una materia sólida que es transportada por los ríos a mares y lagos, para depositarse allí en el fondo y constituir nuevas rocas. Linneo desarrolló esta teoría mediante un elaborado modelo en el que las hierbas o algas de la superficie desempeñan un papel importante para mantener las aguas quietas (como en el mar de los Sargazos) y favorecer la sedimentación; pero los detalles de este modelo no deben preocuparnos, ya que estaba equivocado prácticamente en su totalidad. Lo que sí es significativo, sin embargo, es que

estas investigaciones llevaron a Linneo a plantearse la cuestión de la edad de la Tierra.

En la década de 1740, era ya muy conocida la existencia de fósiles en lugares alejados de los mares y estaba ampliamente aceptada la idea de que estos fósiles eran los restos de seres que vivieron en otros tiempos. Esta idea había ganado en credibilidad después de conocerse el trabajo del danés Niels Steensen (1638-1686), que latinizó su nombre convirtiéndolo en Nicolaus Steno y en general recibe sencillamente el nombre de Steno. A mediados de la década de 1660, estableció la conexión entre las características distintivas de los dientes de los tiburones y las de los restos fósiles hallados en estratos rocosos tierra adentro, lejos del mar, y que él reconoció también como dientes de tiburones. Steno argumentó que los diferentes estratos de rocas se habían depositado bajo el agua en épocas diferentes de la historia de la Tierra, y muchos de sus sucesores del siglo XVIII, e incluso del XIX, identificaron este proceso con el Diluvio universal (o con una serie de diluvios). Linneo aceptaba el relato bíblico del Diluvio, pero en su razonamiento decía que un suceso de corta duración (una inundación que hubiera durado menos de 200 días) no podía haber trasladado a los seres vivos lejos tierra adentro y haberlos cubierto con sedimentos en tan poco tiempo —«aquel que atribuya todo esto al Diluvio, que llegó de repente y de repente se fue, es verdaderamente alguien ajeno a la ciencia», escribió, «y es ciego, porque sólo ve a través de los ojos de otros, si es que ve realmente algo»—.[20] Por el contrario, Linneo afirmaba que inicialmente la Tierra estaba toda ella cubierta de agua, y que el agua había estado descendiendo continuamente desde entonces, convirtiendo cada vez más zonas en tierra firme y dejando tras de sí fósiles como prueba de que las aguas habían cubierto en otro tiempo la Tierra. Estaba claro que todo esto requería mucho más que los 6000 años de historia que los expertos bíblicos de la época cal-

culaban, pero Linneo nunca se decidió a afirmarlo abiertamente.

En el siglo XVIII, había ya razones para poner en duda la fecha del 4004 a. C. que había calculado para la creación del mundo el arzobispo James Ussher en 1620, y no sólo desde el ámbito de la ciencia, sino también desde el de la historia. En aquel tiempo, empezaba a llegar a Europa información sobre China, principalmente como consecuencia de la obra de los misioneros jesuitas franceses, y se llegó a saber con certeza que el primer emperador sobre el que había datos documentados ocupó el trono de China unos 3000 años antes del nacimiento de Cristo, lo cual implicaba que la historia de China se remontaba a una época mucho más lejana. Aunque algunos teólogos se limitaron a intentar que la cronología de Ussher fuera compatible con los datos de China, Linneo escribió que él «habría creído gustoso que la Tierra era más antigua que lo que afirmaban los chinos, si esto hubiera sido compatible con las Sagradas Escrituras», y que «en otros tiempos, la naturaleza hubiera formado la Tierra, la hubiera destrozado y luego la hubiera formado otra vez».[21] Linneo no podía decidirse a afirmar, con estas palabras, que la interpretación teológica habitual de la Biblia estaba equivocada. Sin embargo, en Francia, su contemporáneo Georges-Louis Leclerc, conocido para la posteridad como el conde de Buffon, se decidía a dar este paso hacia delante y a realizar los primeros experimentos verdaderamente científicos para determinar la edad de la Tierra.

EL CONDE DE BUFFON: «HISTOIRE NATURELLE» Y ESTIMACIONES SOBRE LA EDAD DE LA TIERRA

Buffon (así es como le llamaremos en aras de la coherencia) nació el 7 de septiembre de 1707 en Montbard, al noroeste de Dijon, que entonces, como ahora, era la capital de la región de

Borgoña. Sus antepasados por línea paterna habían sido campesinos hasta un par de generaciones anteriores, pero el padre de Buffon, Benjamin-Francois Leclerc, fue un modesto funcionario que trabajaba en la administración local en cuestiones relativas al impuesto de la sal. Pero, en 1714, falleció un tío materno de Buffon, dejando una fortuna enorme a su hermana, la madre de Buffon. Con este dinero, Leclerc compró todo el pueblo de Buffon, cercano a Montbard, además de extensos terrenos y también propiedades en Montbard y Dijon, y obtuvo un nombramiento como consejero en el parlamento local de Dijon. La expresión *nuevo rico* le iba como anillo al dedo, y el propio Buffon, quizás porque le acomplejaban sus orígenes humildes, fue durante toda su vida un vanidoso preocupado por ascender en la escala social. La familia estableció su residencia en Dijon y Buffon entró como alumno en el colegio de los jesuitas, de donde salió en 1726 con una licenciatura en leyes, aunque también había estudiado matemáticas y astronomía.

Lo que fue la vida de Buffon durante los años siguientes, sólo se conoce en líneas generales. Parece ser que pasó algún tiempo en Angers, donde estudió medicina y probablemente botánica, pero se marchó de allí sin obtener ningún título oficial. Posteriormente, Buffon afirmó que esto había sido consecuencia de un duelo, pero es casi seguro que se inventó esta historia para quedar bien. En algún momento conoció a dos viajeros procedentes de Inglaterra: el segundo duque de Kingston, que entonces aún no había cumplido los 20 años, y su tutor o acompañante Nathan Hickman. Buffon se encontró con ellos cuando estaban haciendo el *Grand Tour*.[*] La comitiva desde luego era grande —el duque viajaba con un séquito de sirvientes y un abultado equipaje en varios carruajes, y residió en magníficos alojamientos, a veces durante semanas o incluso meses consecutivos—. Era el estilo de vida al que aspiraba el joven Buffon y pronto tuvo una oportunidad de hacer realidad sus deseos. En

el verano de 1731, Buffon dejó a sus compañeros y regresó a Dijon, donde su madre se encontraba gravemente enferma y falleció el 1 de agosto. A continuación, Buffon se reunió de nuevo con el grupo inglés en Lyon, desde donde viajaron a través de Suiza hasta Italia. En agosto de 1732 Buffon estaba ya de vuelta en París, pero fue entonces cuando su vida cambió de una manera drástica y, a partir de finales de aquel año, nunca volvió a emprender un viaje, exceptuando los desplazamientos que realizaba habitualmente entre Montbard y París.

El punto de inflexión en la vida de Buffon se produjo cuando su padre volvió a casarse, el 30 de diciembre de 1732, e intentó apropiarse de la fortuna de toda la familia, incluida la parte que le había dejado a Buffon su madre. Aunque Leclerc había tenido en total cinco hijos en su primer matrimonio, dos de ellos habían muerto con poco más de 20 años en 1731, el mismo año en que falleció su madre; otro hijo se había hecho monje y la única hija superviviente había ingresado en un convento como monja. Esto dejaba a Buffon, con 25 años, y a su padre como únicos combatientes por la herencia. El resultado fue que Buffon consiguió una fortuna sustancial por derecho propio, además de la casa y las tierras de Montbard y el pueblo de Buffon. Esta última propiedad era especialmente importante porque él ya había empezado a firmar como George-Louis Leclerc de Buffon durante el *Grand Tour*, seguramente porque creía que su auténtico nombre no era categoría suficiente teniendo por amigo al duque de Kingston. Sin embargo, nunca volvió a hablarse con su padre y, a partir de 1734, dejó el apellido Leclerc y firmó sencillamente como Buffon.

Podía haber llevado una vida de ocio indolente. Para hacemos una idea de su fortuna basta decir que los ingresos anuales de Buffon ascendían a alrededor de 80 000 libras anuales en una época en que el mínimo necesario para que un caballero se mantuviera de una forma adecuada a su posición social (aunque

no al nivel del duque de Kingston) era aproximadamente 10 000 libras anuales. Sin embargo, Buffon no se conformó con sus riquezas heredadas. Administró sus propiedades acertadamente y obteniendo beneficios, organizó la producción de plantones de árboles para marcar los bordes de los caminos de Borgoña, montó una fundición de hierro en Buffon y creó otros negocios. Mientras hacía todo esto, su interés por la historia natural acabó convirtiéndose en lo que hubiera sido un arduo trabajo a tiempo completo para la mayoría de las personas. Para conseguir todo esto y superar lo que él consideraba su pereza natural, Buffon pagaba a un campesino para que le sacara de la cama, en el sentido físico de la expresión, cada mañana a las cinco de la madrugada y se asegurara de que estaba despierto. Durante medio siglo siguió la rutina de empezar a trabajar en cuanto estaba vestido, hacer un alto para desayunar (siempre dos vasos de vino y un panecillo) a las nueve, y volver al trabajo hasta las dos del mediodía, hora a la que tomaba pausadamente el almuerzo y conversaba con invitados o con visitantes ocasionales;[22] después dormía una breve siesta y daba un largo paseo, para luego volver al trabajo entre las cinco y las siete de la tarde. A las nueve se iba a la cama sin cenar.

Esta dedicación a un duro trabajo explica cómo fue posible físicamente que Buffon produjera una de las obras más monumentales e influyentes de la historia de la ciencia, su *Histoire Naturelle*, que se publicó en 44 volúmenes entre 1749 y 1804 (los ocho últimos se editaron, utilizando materiales de Buffon, después de su muerte, que acaeció en 1788). Fue la primera obra que abarcó la historia natural en su totalidad y se escribió con un estilo claro y accesible, lo que hizo que estos libros fueran famosos *best sellers*. Se realizaron muchas ediciones y traducciones, que contribuyeron a aumentar los ingresos de Buffon y a difundir el interés por la ciencia ampliamente durante la segunda mitad del siglo XVIII. Buffon no hizo grandes contri-

buciones originales a la comprensión del mundo natural (en cierto modo es posible que obstaculizara el progreso, sobre todo con su oposición a las teorías de Linneo sobre las especies), pero reunió una gran riqueza de materiales y les dio una forma coherente, proporcionando un trampolín a otros investigadores y un estímulo para animar a otros a convertirse en naturalistas. Pero tampoco acaba aquí la historia, ya que además (o junto con) todo esto, a partir de 1739 Buffon fue el superintendente (o responsable del mantenimiento) del Jardín du Roi, que era el jardín botánico del rey en París.

El modo en que Buffon accedió a este cargo fue algo típico de la forma en que funcionaba el *ancien régime*. Buffon tenía contactos con la aristocracia (en parte por el tiempo que había pasado en París en compañía del duque de Kingston), era al menos un caballero, aunque se daba aires de aristócrata, tenía medios de vida independientes (un factor clave, ya que el gobierno estaba casi en bancarrota y, en vez de poder cobrar su salario completo, en realidad tuvo que poner parte de su propio dinero de vez en cuando para cubrir los gastos y conseguir que los jardines se mantuvieran de manera efectiva) y, además, era bueno en su trabajo.

En la década de 1730, Buffon ya había destacado en los círculos científicos por sus publicaciones de matemáticas en las *Mémoires* de la Académie des Sciences y por sus experimentos de silvicultura, realizados con el objetivo de impulsar la reforestación y proporcionar madera de mejor calidad para los barcos de la Armada francesa. Entró en la Académie des Sciences en 1734 y ascendió en su estructura jerárquica hasta llegar a ser miembro asociado en junio de 1739, cuando tenía 31 años. Justo un mes más tarde, el superintendente del Jardin du Roi murió inesperadamente y, dado que el otro candidato principal al puesto se encontraba en Inglaterra, los contactos de Buffon se movieron rápidamente para introducirlo en este cargo, que

ocuparía durante los 41 años siguientes. Aunque Buffon fue enormemente importante e influyente como gestor y divulgador científico,[23] fue su contribución al desarrollo de teorías científicas originales lo que nos interesa en este libro, y dichas teorías pueden explicarse rápidamente.

Su vida privada se puede explicar aún más rápidamente. En 1752, a los 44 años de edad, Buffon contrajo matrimonio con una muchacha de 20 años, Marie-Françoise, y ésta le dio una hija, que murió en la infancia, y un hijo que nació el 22 de mayo de 1764. Después del nacimiento del segundo niño, Marie-Françoise estuvo enferma casi permanentemente, hasta que falleció en 1769. El hijo, apodado *Buffonet*, fue una triste decepción para su padre, porque se convirtió en un derrochador y un caballista temerario, cuya capacidad intelectual apenas fue suficiente para que hiciera carrera como oficial en el ejército, donde, por supuesto, los grados se compraban y no era preciso ganarlos por méritos. A pesar de todo esto, Buffon hizo las disposiciones pertinentes para que su hijo le sucediera en el Jardín du Roi. Sin embargo, cuando Buffon cayó gravemente enfermo, las autoridades dieron los pasos necesarios para cambiar dichas disposiciones relativas a la sucesión. Buffon recibió el título de conde en julio de 1772. Buffonet heredó este título, pero acabó lamentándolo; tras la Revolución Francesa, murió como víctima del Terror, guillotinado en 1794.

La contribución menos convencional (aunque no del todo original) de Buffon a la ciencia fue la hipótesis de que la Tierra se había formado a partir de materiales desprendidos del Sol como resultado del impacto de un cometa, una teoría que basó en un comentario de Newton, según el cual «los cometas en ocasiones caen sobre el Sol».[24] Esta teoría sugiere que la tierra se formó en un estado de materia fundida y se había ido enfriando hasta llegar al punto en que la vida podía existir. Pero parecía claro que esto tenía que haber durado mucho más de

los aproximadamente 6000 años que daba la estimación de los teólogos de la época para el tiempo transcurrido desde la creación. El propio Newton, en los *Principia*, decía algo parecido:

> Un globo de hierro al rojo vivo que fuera de igual tamaño que la Tierra, es decir con un diámetro de unos 40 000 000 de pies [alrededor de 12 168 kilómetros], difícilmente se enfriaría en un número igual de días, es decir, en menos de 50 000 años.

Sin embargo, no intentó calcular lo que tardaría un globo como ése en enfriarse, y se conformó con indicar a la posteridad el modo de efectuar el cálculo:

> Sospecho que la duración del calor, teniendo en cuenta ciertas causas latentes, puede aumentar en una proporción inferior a la del diámetro; y me alegraría que se investigara la verdadera proporción mediante experimentos.

Buffon aprovechó la sugerencia. En el experimento que él llevó a cabo se realizó el calentamiento de bolas de hierro de diferentes tamaños hasta que éstas estuvieron al rojo vivo, para cronometrar después el tiempo que tardaban en enfriarse hasta que era posible tocarlas sin quemarse la piel. Después, utilizando una técnica bastante tosca y elemental, Buffon extrapoló el tiempo que tardaría en enfriarse una bola similar, pero del tamaño de la Tierra. El experimento no era realmente muy preciso, pero fue un serio intento científico para calcular la edad de la Tierra, que no tenía en cuenta en absoluto la Biblia, sino que extrapolaba los resultados a partir de mediciones reales. Esto hizo que constituyera un hito dentro de la ciencia. En su *Histoire Naturelle*, Buffon escribe:

> En vez de los 50 000 años que [Newton] calcula para el tiempo que necesitó la Tierra para enfriarse hasta llegar a su temperatura actual, serían 42 964 años y 221 días los que habrían sido necesarios para enfriarla hasta el punto en que cesara de arder.

Ignoremos la falsa exactitud de las cifras que se mencionan. Buffon, continuando con sus cálculos, estimó que, en números

redondos, la edad de la Tierra debía ser al menos 75 000 años. No nos dejemos engañar por el hecho de que esto sea mucho menos que la mejor estimación actual, que da 4500 «millones» de años. Lo que importa en este contexto es que el número obtenido supone diez veces la edad que deducían los expertos en la Biblia, provocando así que la ciencia entrara en un conflicto directo con la teología, en la segunda mitad del siglo XVIII.[25] Pero la importancia de la estimación realizada por Buffon para la edad de la Tierra palidece si se compara con la que hizo un miembro de la generación siguiente de científicos franceses, Jean Fourier. Sin embargo, por desgracia, Fourier se quedó al parecer tan estupefacto ante el resultado de su propio cálculo que nunca llegó a publicarlo.

MÁS ESTIMACIONES SOBRE LA EDAD DE LA TIERRA: JEAN FOURIER Y EL ANÁLISIS DE FOURIER

Fourier, que vivió desde 1768 hasta 1830, se le recuerda hoy en día sobre todo por sus trabajos matemáticos. Es una de las personas para cuya vida y obra no tenemos espacio suficiente aquí —aunque hemos de mencionar que prestó servicios como consejero científico a Napoleón en Egipto, donde acabó recorriendo la mitad del país entre 1798 y 1801, y ostentó cargos en la administración civil francesa bajo el gobierno de Napoleón, siendo nombrado primero barón y luego conde por sus servicios al Imperio—. Sobrevivió al levantamiento que condujo a la restauración de la monarquía con Luis XVII y alcanzó una posición prominente dentro de la ciencia francesa antes de morir como consecuencia de una enfermedad que contrajo mientras estaba en Egipto. Lo esencial de su obra es el desarrollo de técnicas matemáticas para tratar los fenómenos que varían en función del tiempo —por ejemplo, para descomponer la complicada pauta de variaciones de presión que se producen en una rá-

faga de sonido, convirtiéndola en un conjunto de sencillas ondas sinusoidales que se pueden luego sumar todas ellas para reproducir el sonido original—. Las técnicas del análisis de Fourier se utilizan todavía actualmente en la vanguardia de la investigación científica, por ejemplo, en el caso de los astrónomos que intentan medir la variabilidad de las estrellas o de los quásares. Fourier desarrolló estas técnicas no sólo por amor a las matemáticas, sino porque las necesitaba para explicar matemáticamente un fenómeno que le tenía intrigado: el modo en que fluye el calor desde un objeto más caliente a otro que está más frío. Fourier lo hizo todavía mejor que Buffon en cuanto a desarrollar conjuntos de fórmulas matemáticas para describir el flujo del calor, basándose, por supuesto, en numerosas observaciones experimentales, y utilizó estas fórmulas matemáticas para calcular cuánto podía haber tardado la Tierra en enfriarse. También tuvo en cuenta un factor que Buffon había pasado por alto. La corteza sólida de la Tierra actúa como una capa aislante alrededor de su interior de materiales fundidos, limitando el flujo de calor de tal manera que, de hecho, hoy en día el núcleo está todavía fundido, aunque la superficie esté fría.[26] Aunque Fourier tuvo que haber anotado en algún lugar el número que obtuvo a partir de sus cálculos, parece ser que destruyó el papel en el que lo había escrito. Lo que dejó a la posteridad fue una fórmula para calcular la edad de la Tierra (escrita en 1820). Aplicándola, cualquier científico que estuviera interesado en el tema podía haber introducido los datos relativos al flujo de calor y haber obtenido así la edad de la Tierra. Si lo hacemos, la fórmula de Fourier nos da una edad de 100 «millones» de años —una cifra más de 1000 veces mayor que la estimación de Buffon y sólo 50 veces menor que la mejor estimación moderna. En 1820, la ciencia estaba ya en camino para medir la auténtica escala temporal de la historia.

Sin embargo, el resto de las aportaciones de Buffon pone de relieve la intensidad con que la ciencia de finales del siglo XVIII estaba luchando por adaptarse, a partir de los restos fósiles, al peso creciente de las pruebas relativas a la antigüedad de la vida en la Tierra. Afirmó que el calor era el único responsable de la creación de la vida y tomó la iniciativa, aparentemente lógica, de argumentar que, dado que la Tierra estuvo caliente en el pasado, resultaba fácil la formación de materia viva, y ésta sería la razón por la que había unos huesos fósiles tan grandes (actualmente sabemos que se refería a los huesos de los mamuts y los dinosaurios). En su *Histoire Naturelle*, de vez en cuando Buffon hacía referencia a una versión anterior de la teoría de la evolución —estas teorías se discutieron mucho antes de que llegara la obra de Charles Darwin, cuya contribución clave, como ya veremos, fue encontrar el «mecanismo» de la evolución (la selección natural)—. Sin embargo, sigue siendo más bien asombroso (aun aceptando la idea, actualmente superada, de que algunas especies sean «superiores» o «inferiores» a otras) leer lo que Buffon decía ya en 1753, en el volumen IV de su *Histoire Naturelle*:

> Si admitimos que existen familias de plantas y animales, de tal forma que el asno puede ser de la familia del caballo, y que el uno se diferencia del otro sólo en una degeneración que se ha producido con respecto a un antepasado común, esto nos puede llevar a admitir que el mono es de la familia del hombre, que no es sino un hombre degenerado, y que él y el hombre han tenido un antepasado común, del mismo modo que lo han tenido el asno y el caballo. De esto se deduciría que toda familia, tanto vegetal como animal, habría surgido de un único linaje, que después de una sucesión de generaciones habría llegado a un nivel superior en el caso de algunos de sus descendientes y a un nivel inferior en el caso de otros.

Buffon presentaba también uno de los argumentos más claros contra la idea de las criaturas vivientes hubieran sido diseñadas individualmente por un creador inteligente, aunque no expresaba esta conclusión. Sobre el cerdo indicaba lo siguiente:

No parece haber sido formado según un plan original, especial y perfecto, ya que es una composición de otros animales; evidentemente tiene partes inútiles, o más bien partes de las que no se puede hacer uso alguno, unas pezuñas con todos los huesos perfectamente formados y que, sin embargo, no sirven para nada. La naturaleza está lejos de someterse a causas últimas en la formación de estas criaturas.

Incluso traducidos, estos pasajes nos dan una idea del motivo por el cual los escritos de Buffon fueron tan populares; en Francia está considerado como una importante figura literaria a causa de su estilo elegante, independientemente del tema sobre el que estuviera escribiendo.

Cuando el tema llegó a la vida cotidiana, Buffon se vio también implicado en el debate relativo al modo en que funciona la reproducción sexual. Existían tres escuelas de pensamiento. Una de ellas sostenía que las semillas de las generaciones futuras estaban almacenadas dentro de las hembras y que la única contribución del macho era activarlas para que cobraran vida. Otra teoría afirmaba que la semilla procedía del macho y que el papel de la hembra era sólo alimentarla, y unos pocos de la tercera escuela de pensamiento aseguraban que eran esenciales las aportaciones de ambos miembros de la pareja, explicando así por qué un niño podía tener «los ojos de su padre» y «la nariz de su madre». Buffon suscribía esta tercera teoría pero mediante un modelo terriblemente complicado que no vale la pena explicar aquí.

Buffon, que era en muchos aspectos un hombre —y un científico— de su tiempo, falleció en París, el 16 de abril de 1788, después de una larga y dolorosa enfermedad, relacionada en parte con cálculos renales. La sociedad que conoció estaba a punto de cambiar drásticamente mediante una revolución; pero en las ciencias la revolución ya se había producido y su impacto se iría acelerando al entrar en el siglo XIX, incluso en medio de períodos de agitación política (un ejemplo de esto lo tenemos en la obra de Fourier). En cuanto a comprender el fenó-

meno de la vida en la Tierra, el siguiente gran salto lo dio en París Georges Cuvier, que retomó el hilo en la década de 1790 allí donde Buffon lo había dejado en la década de 1780.

Georges Cuvier: «Lecciones de anatomía comparada»; especulaciones sobre la extinción

Cuvier nació el 23 de agosto de 1769 en Montbéliard, que entonces era la capital de un principado independiente, pero ahora forma parte de Francia, en la frontera con Suiza. Aunque los habitantes de Montbéliard hablaban francés, eran en su mayoría luteranos y tenían muchos vínculos culturales con los estados germanófonos del norte, así como una profunda antipatía hacia los franceses, que en repetidas ocasiones habían intentado absorber a su diminuto vecino. En el momento en que Cuvier nació, Montbéliard llevaba unos doscientos años vinculado políticamente al Gran Ducado de Württemberg y estaba gobernado por una rama de la familia del gran duque en su nombre. Por lo tanto, Montbéliard no era una parroquia remota y atrasada, sino un camino trillado y claro para que los jóvenes capaces salieran del principado y entraran en un ámbito europeo más amplio. El padre de Cuvier había sido un soldado que había servido como oficial mercenario en un regimiento francés, pero se encontraba retirado con media paga en el momento en que nació el muchacho. Aunque la familia no tenía un céntimo (la madre de Cuvier, que era veinte años más joven que su marido, no tenía fortuna propia), los contactos con Francia proporcionaron a Cuvier un poderoso patrocinador potencial en la figura del conde de Waldner, que había sido el oficial al mando del regimiento de su padre y fue el padrino del chico. Esto fue más que una simple relación nominal, ya que el joven Cuvier visitaba a menudo la residencia de Waldner cuando era niño.

A principios de 1769, el primer hijo del ex soldado y su esposa, un niño llamado Georges, había muerto a los cuatro años de edad; cuando nació otro niño, fue bautizado como Jean-Leopold-Nicholas-Frédéric, y pronto se añadió a la lista el nombre de Dagobert, que era uno de los nombres de su padrino. Sin embargo, al muchacho se le conoció siempre por el nombre de su difunto hermano y él mismo firmó siempre como Georges a lo largo de su vida de adulto, pasando a la historia como Georges Cuvier. En él pusieron sus padres todas sus esperanzas y ambiciones, y recibió la mejor educación que pudieron darle; cuatro años más tarde, nació otro niño, al que llamaron Frédéric y que no recibió, ni de lejos, tantas atenciones.

A partir de los 12 años de edad, Cuvier visitó a menudo la casa de su tío paterno, Jean-Nicholas, que era pastor luterano y tenía la colección completa de todos los volúmenes de la *Histoire Naturelle* de Buffon que habían sido publicados hasta entonces. Georges quedó fascinado por aquella obra y se pasaba horas absorto leyéndola, saliendo también al campo para recoger sus propios especímenes; sin embargo, nada permitía pensar en aquel momento que algún día pudiera ganarse la vida como naturalista. Lo que sus padres planearon para él, pensando en una carrera segura y respetable, fue la salida tradicional de convertirse en pastor luterano, pero fue rechazada su solicitud para una plaza gratuita en la Universidad de Tubinga y la familia era demasiado pobre para pagar las tasas académicas. Sin embargo, aunque no disponían de recursos, lo que sí tenían era contactos en la Corte a través del conde de Waldner. Por aquel entonces, el gran duque de Württemberg, Karl Eugen, visitó al gobernador de Montbéliard, que era el príncipe Frédéric. El gran duque fue informado sobre la difícil situación en que se encontraba el muchacho y le ofreció una plaza gratuita en la recién inaugurada Academia de Stuttgart, que el propio gran duque había fundado en 1770 y que accedió a la categoría de universidad por

un decreto del emperador José II en 1781; Cuvier accedió a su plaza en aquella nueva universidad en 1784, cuando contaba 15 años de edad. La Academia se había fundado con el propósito de que fuera un centro de preparación de funcionarios civiles, con el fin de formar a jóvenes para los puestos de la administración en los numerosos estados en que estaba fragmentada Alemania en aquella época. Estaba dirigida como si fuese un centro militar, con uniformes, un código de conducta rígido y unas reglas que se aplicaban estrictamente, pero ofrecía una excelente educación y, al menos inicialmente, un empleo garantizado para toda la vida, después de terminar los estudios. Sin embargo, no todos apreciaban esta oferta. Friedrich Schiller se había licenciado en la Academia de Stuttgart en 1782 y no tardó en llegar a chocar con las autoridades, porque no deseaba un empleo para toda la vida —quería ser poeta y dramaturgo, pero se vio obligado a aceptar un puesto de cirujano militar,[27] que ocupó hasta su huida de la región que estaba bajo la influencia de Karl Eugen en 1784, justo cuando Cuvier se enfrentaba con su nueva vida—. Pero, cuando Cuvier se licenció, en 1788, la situación había pasado a ser la contraria. La Academia de Stuttgart, y otras instituciones similares por toda Alemania, habían tenido tanto éxito que su producción de funcionarios potenciales había llegado a ser mayor que el número de empleos que podía haber para ellos y, como muchos de sus contemporáneos, Cuvier, en vez de recibir un empleo para toda su vida, se quedó abandonado a su suerte, teniendo que buscarlo por sus propios medios. Por desgracia, Cuvier carecía totalmente de recursos económicos y, como solución a corto plazo para ganarse la vida mientras evaluaba la situación, aceptó un trabajo como preceptor con una familia de Caen, Normandía, siguiendo los pasos de otro joven de Montbéliard, Georg-Friedrich Parrot, que se cambiaba a un empleo mejor y había recomendado a su paisano como sucesor.

Como diría la maldición apócrifa china, ésta era una época muy interesante para vivir en Francia. Afortunadamente, Normandía estaba en un principio bastante alejada de las agitaciones políticas que tenían lugar en París, por lo que Cuvier pudo volver a dedicarse a sus estudios botánicos y zoológicos (que habían florecido en Stuttgart y sobre los cuales escribió a algunas personas con las que había entablado amistad en la universidad), tras conseguir autorización para acceder a los jardines botánicos de Caen y a la biblioteca de la universidad. Cuvier trabajó para el marqués d'Héricy y su familia como preceptor de su hijo Achille. Esta familia poseía una casa en Caen y dos modestos castillos, aunque solían utilizar principalmente uno de ellos, el de Fiquainville, como residencia de verano.

Aunque el aniversario de la Revolución Francesa es oficialmente el 14 de julio, fecha en que se conmemora la toma de la Bastilla en 1789, las tímidas reformas que emprendió la Asamblea Nacional como respuesta a las revueltas de aquel año, fueron una tapadera que contuvo los sucesos hasta 1791, cuando la familia real desencadenó la oleada siguiente de cambios con su fallido intento de huir. Fue también durante aquel año de 1791 cuando Normandía se vio alcanzada por la agitación, la universidad se cerró y en las calles hubo desórdenes provocados por el hambre. La marquesa d'Héricy, y en menor medida su esposo, veían quizá con simpatía algunas de las demandas de los reformistas, pero como miembros de la aristocracia estaban claramente amenazados, por lo que la marquesa, su hijo Achille y Cuvier se trasladaron definitivamente a su residencia de verano de Fiquainville por razones de seguridad. El Marqués los visitaba de vez en cuando, pero el marqués y la marquesa se separaron Oficialmente en aquellos días (lo cual podría haber sido una estratagema para proteger, cualquiera que fuese el destino del marqués, algunas de las propiedades familiares poniéndolas a nombre de la marquesa). Francia se convirtió en una re-

pública y Cuvier, dado que vivía tranquilamente en el campo, tuvo la oportunidad de convertirse en un auténtico naturalista de campo, siguiendo deliberadamente el camino abierto por Linneo, con la identificación y la descripción de cientos de especies. Esto le animó a desarrollar sus propias teorías sobre el modo en que tendrían que clasificarse las especies y sobre las relaciones entre los diferentes tipos de animales y plantas. Comenzó a publicar en los periódicos franceses más importantes y estableció contacto por correspondencia con los más destacados expertos en historia natural que había en París. Sin embargo, justo cuando comenzaba a hacerse un nombre por sí mismo, Francia entró en la etapa más atroz de la Revolución, el período que se conoce como el Terror, que empezó con las ejecuciones de Luis XVI y María Antonieta en 1793. El Terror duró más de un año y alcanzó todos los rincones de Francia. En aquella época fueron ejecutadas más de 40 000 personas contrarias (o supuestamente contrarias) al régimen jacobino; había que estar con los jacobinos o contra ellos y, en el municipio de Bec-aux-Cauchois, al que pertenecía Fiquainville, Cuvier optó sabiamente por estar con ellos. Desde noviembre de 1793 hasta febrero de 1795 trabajó, por un salario de 30 libras al año, como secretario del municipio, lo cual le proporcionó unas influencias importantes, que utilizó para proteger a la familia d'Héricy frente a los peores excesos de aquel período. Siendo ya conocido en el mundo científico parisino, Cuvier se dio a conocer entonces, aunque en menor medida, como administrador capaz y con unas credenciales políticas impecables. Cuando el Terror perdió fuerza,[28] a principios de 1795, Cuvier visitó París con Achille d'Héricy, que tenía ya casi 18 años y no habría de necesitar un preceptor durante mucho más tiempo. No está claro cuál fue exactamente el objetivo de esta visita, ya que parece haber sido ocultada deliberadamente, pero la explicación más probable es que Cuvier estuviera ejerciendo presiones

en nombre de la familia para que se le devolviera al menos algunas de las propiedades que le habían sido confiscadas, y que también aprovechara la oportunidad de tantear sus contactos científicos en París para averiguar algo sobre la posibilidad de un empleo en el Museo de Historia Natural (en el que estaba incluido el Jardín des Plantes, denominado anteriormente el Jardín du Roi). El resultado de estas conversaciones debió de ser prometedor, ya que Cuvier, tras regresar a Normandía, dimitió de su cargo de secretario del Ayuntamiento de Bec-aux-Cauchois y volvió a París, unos pocos meses antes de su vigesimosexto cumpleaños.

Cuvier entró a formar parte del personal del Museo de Historia Natural como ayudante del profesor de anatomía comparada y continuó vinculado al museo durante el resto de su vida, llegando a ocupar cargos más importantes, incluso los más elevados. Dejando atrás los altibajos de su juventud, se asentó permanentemente en París, rechazando, entre otras, la oferta de sumarse a la expedición de Napoleón a Egipto en 1798. Un año más tarde fue nombrado profesor de historia natural del Collége de France, y un año después comenzó a publicar lo que acabaría siendo su obra maestra en cinco volúmenes, Lecciones de anatomía comparada. Sin embargo, a menudo andaba escaso de dinero, por lo que tuvo que realizar diversos trabajos para el gobierno y en el ámbito de la educación, simultáneamente o superponiendo de manera parcial un trabajo a otro, para conseguir una cierta seguridad económica. Entre otras cosas, Cuvier desempeñó un papel importante en la organización de la nueva Sorbona y, desde alrededor de 1810 hasta su muerte en París, víctima de una epidemia de cólera, el 13 de mayo de 1832, fue con toda probabilidad el biólogo más influyente del mundo, tan sólidamente establecido que sus cargos nunca se vieron seriamente amenazados por la Restauración de los Borbones en 1815. En 1804 se había casado con una viuda, Anne-

Marie Duvaucel, que aportó a la familia sus cuatro hijos; hay algunas pruebas[29] de que con anterioridad Cuvier había tenido al menos dos hijos con una amante que tuvo durante mucho tiempo y cuyo nombre no se recuerda. En 1831 recibió el título de barón; en aquella época era muy raro que a un protestante se le concediera un título de nobleza en Francia.

Cuvier estableció nuevos estándares en la anatomía comparada, aportando ideas nuevas sobre el modo en que funcionan conjuntamente las distintas partes de un animal vivo. Pronto se comprobó que estas ideas nuevas resultaban de un valor incalculable a la hora de interpretar y clasificar los restos fósiles. Ilustró este planteamiento comparando la anatomía corporal de los animales carnívoros con la de los herbívoros. Un carnívoro debe tener unas patas adecuadas para correr rápido y capturar su presa, unos dientes adecuados para desgarrar la carne, garras para aferrarse a su víctima, etc. En cambio, un animal herbívoro tiene unos dientes planos adecuados para triturar, pezuñas en vez de zarpas, y otras características distintivas. Exagerando sólo ligeramente, Cuvier afirmó en sus *Lecciones de anatomía comparada* que un experto podría reconstruir un animal completo viendo únicamente un hueso; ciertamente es verdad que, aunque estemos lejos de ser expertos, la identificación de un solo diente como incisivo nos puede decir inequívocamente que, por ejemplo, el animal al que pertenece el diente tiene zarpas y garras, y no pezuñas.[30]

Por lo que respecta al mundo de los seres vivos, los estudios comparativos de Cuvier llevaron a este científico a darse cuenta de que no era posible considerar todas las formas de vida animal que hay en la Tierra como pertenecientes a un único sistema lineal en el que se vinculen las llamadas formas inferiores de vida con las que se denominan formas superiores (donde el hombre, desde luego, aparece situado en el extremo superior de la supuesta escalera de la creación). En vez de esto, Cuvier

clasificó a todos los animales en cuatro grupos principales (vertebrados, moluscos, articulados y radiados), tales que cada uno de ellos tenía su propio tipo de anatomía. La clasificación que realizó Cuvier no se utiliza ya actualmente, pero el hecho de que hiciera tal clasificación constituyó una ruptura significativa con lo que anteriormente había sido la forma de razonar en zoología y marcaba un camino distinto para seguir hacia delante en esta disciplina.

Aplicando estas ideas al estudio de los restos fósiles, Cuvier reconstruyó especies extinguidas e inventó, casi sin ayuda de otros, la ciencia que se conoce como paleontología (a propósito, fue el primero que identificó al pterodáctilo, al que bautizó con este nombre). Uno de los resultados prácticos más importantes que produjo esta forma de trabajar fue el hecho de que comenzara a ser posible colocar en un orden los estratos en que aparecían los fósiles —no se llegaba a fecharlos en un sentido absoluto, pero al menos sí a decir cuáles eran más antiguos y cuáles más nuevos—. Trabajando conjuntamente con Alexandre Brongniart (1770-1847), profesor de mineralogía del Museo de Historia Natural, Cuvier dedicó cuatro años a examinar las rocas de la Cuenca de París, identificando los fósiles que aparecían en los distintos estratos, de tal modo que, una vez realizada la comparación original, el descubrimiento de tipos conocidos de fósiles en otros lugares se pudiera utilizar para situar los estratos en la secuencia geológica y cronológica correcta. Incluso llegó a ser posible ver dónde comenzaba la vida. En ediciones posteriores de su *Discours sur la Théorie de la Terre*, publicado en 1825, pero basado en materiales publicados ya en 1812, Cuvier escribía lo siguiente:

> Lo que resulta aún más sorprendente es que la vida en sí misma no haya existido siempre en el planeta, y que resulte fácil para el observador reconocer el momento preciso en que la vida dejó sus huellas por primera vez.

Con pruebas claras, obtenidas a partir de estos estudios, de que muchas especies que habían vivido en la Tierra en otros tiempos estaban entonces extinguidas, Cuvier suscribió la teoría según la cual se habría producido una serie de catástrofes durante las cuales muchas especies se extinguieron, siendo el diluvio relatado en la Biblia sólo la más reciente de todas ellas, y una en la que se extinguieron muchas especies. Algunos llevaron esta hipótesis aún más lejos y afirmaron que después de cada catástrofe Dios había emprendido una creación especial para repoblar la Tierra. Sin embargo, después de flirtear con esta teoría, Cuvier se sumó a la opinión de la mayoría de sus colegas y aceptó que sólo había existido una creación y que a partir de entonces los acontecimientos se habían desarrollado de acuerdo con los planes (o leyes) que Dios había establecido al principio. No vio que hubiera problema alguno en repoblar la Tierra después de cada catástrofe, afirmando que algunas especies aparentemente «nuevas» del registro fósil eran en realidad especies que habían inmigrado desde zonas del mundo que aún no se habían explorado a principios del siglo XIX. Del mismo modo, Cuvier entendió que la historia de la vida se remontaba a al menos cientos de miles de años, llegando así mucho más allá de la estimación de Ussher —pero, incluso con una escala cronológica de cientos de miles de años, se deducía que tenían que haberse producido una y otra vez catástrofes importantes del calibre del Diluvio para explicar la cantidad de cambios que Cuvier estaba detectando en el registro fósil—. No obstante, sus teorías sobre la inmutabilidad de las especies le generaron conflictos con algunos de sus contemporáneos franceses y retrasaron el estudio de la evolución en Francia por un período de tiempo crucial.

Jean-Baptiste Lamarck: reflexiones sobre la evolución

Las teorías a las que se oponía Cuvier eran esencialmente las de Jean-Baptiste Lamarck, que nació en 1744 y que tendrá mayor protagonismo en el capítulo 8. Lamarck era un protegido de Buffon y trabajaba en el Museo de Historia Natural, en París, antes de que Cuvier llegara allí. A partir de 1809, desarrolló un modelo para explicar el modo en que funciona la evolución, basado en la idea de que un individuo puede adquirir ciertas características a lo largo de su vida y luego transmitírselas a las generaciones siguientes. Según el ejemplo clásico, se supone (equivocadamente) que, por el hecho de estirarse para alcanzar las hojas de la copa de un árbol, el cuello de la jirafa se va haciendo cada vez más largo durante toda su vida; cuando la jirafa tiene descendencia, sus crías nacen con los cuellos más largos que los que tendrían si su progenitora nunca hubiera intentado comer hojas. Sin embargo, la manzana de la discordia entre Lamarck y Cuvier fue que Lamarck pensaba que las especies no se extinguían, sino que desarrollaban otras formas, mientras Cuvier opinaba que ninguna especie cambiaba, sino que las catástrofes podían hacer que especies enteras desapareciesen.

Las teorías de Lamarck fueron asumidas y promocionadas por Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, al que habitualmente se menciona sólo como Geoffroy, un contemporáneo cercano de Cuvier (Geoffroy nació en 1772 y murió en 1844) que ya estaba trabajando en el Jardin des Plantes antes de que Cuvier llegara a París. A diferencia de Cuvier, Geoffroy sí que fue a Egipto con Napoleón. Durante la segunda década del siglo XIX, Geoffroy comenzó a desarrollar una variación del tema de la evolución que iba más allá de las teorías de Lamarck y sugería que el medio ambiente podría desempeñar un papel directo en la evolución. Planteó que el medio ambiente podría producir cambios en los organismos vivos (más o menos siguiendo la idea

errónea de Lamarck), pero a continuación sugería la existencia de un proceso que bien se podría llamar selección natural:

> Si estas modificaciones producen efectos nocivos, los animales que las manifiestan perecen y son sustituidos por otros que presentan una forma algo diferente, una forma que ha cambiado con el fin de adaptarse al nuevo entorno.[31]

Esto se acerca asombrosamente al darwinismo, pero en aquella época no se llegó a dar el paso siguiente, en cierto modo a causa de la influencia que tenía Cuvier.

Aunque al principio fueron grandes amigos, después del cambio de siglo empezó a generarse una cierta antipatía profesional entre Cuvier y Geoffroy, de tal modo que en 1818 Cuvier saltó como una fiera cuando Geoffroy publicó un trabajo con el que pretendía probar que «todos» los animales están formados según el mismo esquema corporal, y lo explicaba con descripciones, no sólo del modo en que las diferentes partes del cuerpo de un insecto se corresponden con las distintas partes del cuerpo de un vertebrado, sino que también relacionaba ambos esquemas corporales (el de los vertebrados y el de los insectos) con la estructura de un molusco. En 1830, un año después de la muerte de Lamarck, Cuvier lanzó un mordaz ataque contra Geoffroy, no sólo por aquellas teorías fantasiosas sobre las relaciones entre vertebrados, insectos y moluscos, sino también por la idea, mucho más respetable (teniendo en cuenta los conocimientos de la época), de evolución lamarckiana. Cuvier sostuvo firmemente la opinión de que las especies, una vez creadas, permanecían inamovibles con la misma forma para siempre, o al menos hasta que se extinguían. Exhortó a los jóvenes naturalistas a que se limitaran a «describir» el mundo natural, sin perder el tiempo con teorías que pretendieran «explicar» el mundo natural. En otras circunstancias, la teoría lamarckiana habría sido desarrollada por la generación siguiente para llegar a algo más parecido a la evolución darwiniana, pero, bajo el peso de la autoridad de Cuvier, quedó enterrada y prác-

ticamente olvidada hasta que el propio Darwin hubo publicado la teoría de la evolución por selección natural.

Esto hace que hayamos llegado al momento oportuno para abandonar, temporalmente, nuestra historia del desarrollo de las ciencias de la vida y ponemos al día en lo relativo al progreso de las ciencias físicas en el siglo XVIII. Mientras los horizontes del ser humano se expandían tanto en el tiempo como en el espacio durante el siglo XVIII y al comienzo del siglo XIX, en gran medida gracias a los astrónomos y los biólogos, la investigación práctica del mundo físico (por parte de los propios físicos y también por la de los químicos, al menos quitándose de encima la alquimia) había estado asimismo haciendo enormes progresos. No hubo un avance que fuera de la categoría de los logros de Newton y sus contemporáneos, pero el aumento constante de los conocimientos que se produjo durante este período (que se suele denominar, hablando adecuadamente, la Ilustración) se puede considerar ahora como el precursor del modo espectacular en que la ciencia despegó en el siglo XIX.

Tercera Parte

LA ILUSTRACIÓN

Capítulo 7

LA CIENCIA ILUSTRADA I: LA QUÍMICA SE PONE AL DÍA

La Ilustración

Los historiadores suelen denominar Ilustración al período que, más o menos, sigue al Renacimiento. También se da este nombre al movimiento filosófico que alcanzó su punto culminante en la segunda mitad del siglo XVIII. La característica básica de la Ilustración era la creencia en la superioridad de la razón sobre la superstición. Esto conllevaba la idea de que la humanidad estaba inmersa en un proceso de progreso social, de tal modo que el futuro supondría una mejoría con respecto al pasado; un aspecto de esta mejoría fue el desafío planteado frente a la religión ortodoxa cargada de matices supersticiosos. Tanto la revolución americana como la francesa estuvieron justificadas intelectualmente, en parte, por basarse en los derechos humanos, que fueron un principio seguido como guía por los filósofos de la Ilustración, tales como Voltaire, y por activistas como Thomas Paine. Aunque sólo fue uno de los muchos factores que formaron parte de la Ilustración, el éxito de la física newtoniana al proporcionar una descripción matemática de un mundo ordenado desempeñó claramente un importante papel en el florecimiento de esta corriente durante el siglo XVIII, fomentando la aparición de filósofos que utilizaban una persuasión racionalista e impulsando también a los químicos y bióló-

gos a pensar que los aspectos del mundo natural que entraban en sus disciplinas podrían asimismo explicarse tomando como base unas leyes sencillas. No es tanto el hecho de que Linneo, por ejemplo, modelara sus planteamientos conscientemente basándose en la obra de Newton, sino más bien que la idea de orden y racionalidad como vía para avanzar en la investigación del mundo estaba ya arraigada a principios del siglo XVIII y parecía ser el camino obvio que se debía seguir si se quería avanzar.

Probablemente no fuera del todo una coincidencia que la Revolución Industrial se tuviera lugar primero en Inglaterra, más o menos en el período comprendido entre 1740 y 1780, antes de extenderse al resto de Europa. Hay muchos factores que contribuyeron a que esta revolución se produjera en el lugar y en el momento en que lo hizo; cabe citar, entre otros, las circunstancias geográficas y geológicas de Gran Bretaña (una «isla de carbón»), el temprano florecimiento de lo que se podría llamar democracia (mientras Francia estaba todavía gobernada por el *ancien régime* conservador y aristocrático, y Alemania era un mosaico fragmentado de pequeños estados) y, como un factor añadido, quizás, algún elemento de puro azar. Pero sin duda uno de los factores fue que la visión mecanicista newtoniana del mundo arraigó con mayor rapidez, con firmeza y suficiente naturalidad, en el país de origen de Newton. Una vez que estuvo en marcha la Revolución Industrial, ésta dio un fortísimo impulso a la ciencia, por una parte estimulando el interés por temas tales como el calor y la termodinámica, que tuvieron una gran importancia práctica y comercial en la era del vapor, y por otra parte aportando nuevas herramientas que los científicos podían utilizar en sus investigaciones.

Donde todo esto se ve más claro es en el caso de la química. Si los químicos se quedaron rezagados por detrás de otras ciencias, como la física, hasta bien entrado el siglo XVIII, no es por-

que fueran especialmente estúpidos o supersticiosos. Sencillamente, carecían de herramientas para su trabajo. En astronomía se podía investigar hasta cierto punto sin herramienta alguna, utilizando sólo los ojos; la física, en el siglo XVII, se centraba en el estudio de objetos que se manipulaban fácilmente, como bolas que rodaban por planos inclinados, o un péndulo que oscilaba; incluso los zoólogos y los expertos en botánica podían realizar progresos sirviéndose de las más sencillas lentes de aumento o de microscopios. Sin embargo, lo que los químicos necesitaban, sobre todo, era una fuente de calor fiable y controlable para producir reacciones químicas. Si la fuente de calor era básicamente la forja del herrero, y no era posible medir las temperaturas, la experimentación química estaba condenada a ser un poco tosca y elemental. Incluso entrado ya el siglo XIX, para conseguir un calor más controlable y hacer experimentos más sutiles, los químicos se veían obligados a utilizar un número variable de velas y lámparas de alcohol con varias mechas que podían encenderse o apagarse individualmente; para obtener una fuente localizada de calor intenso, tenían que utilizar un espejo ustorio para concentrar los rayos solares. En cuanto a hacer mediciones precisas de lo que estaba sucediendo, Gabriel Fahrenheit (1686-1736) no inventó el termómetro de alcohol hasta 1709, y para el termómetro de mercurio hubo que esperar hasta 1714, cuando este científico ideó también la escala de temperaturas que ahora lleva su nombre.[1] Esto sucedía justo dos años después de que Thomas Newcomen (1663-1729) construyera la primera máquina de vapor de aplicación práctica para achicar por bombeo el agua que se infiltraba en las minas. Como veremos más adelante, lo que fallaba en el diseño de Newcomen fue incluso más importante que sus aciertos en cuanto a estimular el progreso de la ciencia durante la generación siguiente.

Todos estos factores ayudan a explicar por qué se produjo aquel parón desde Robert Boyle, que estableció las reglas fundamentales para que la química pudiera convertirse en una ciencia, hasta las personas que realmente hicieron de la química una disciplina científica en la época de la revolución industrial. A partir de la década de 1740, el avance fue rápido, aunque a veces fuera confuso, y se puede entender pensando en la vida de trabajo de un puñado de hombres, la mayoría de los cuales fueron contemporáneos y se conocían entre sí. El lugar de honor le corresponde a Joseph Black, que fue pionero en la aplicación a la química de unas técnicas cuantitativas precisas con las que medía, dentro de lo posible, todo lo que intervenía en una reacción y todo lo que salía de ella.

JOSEPH BLACK Y EL DESCUBRIMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO

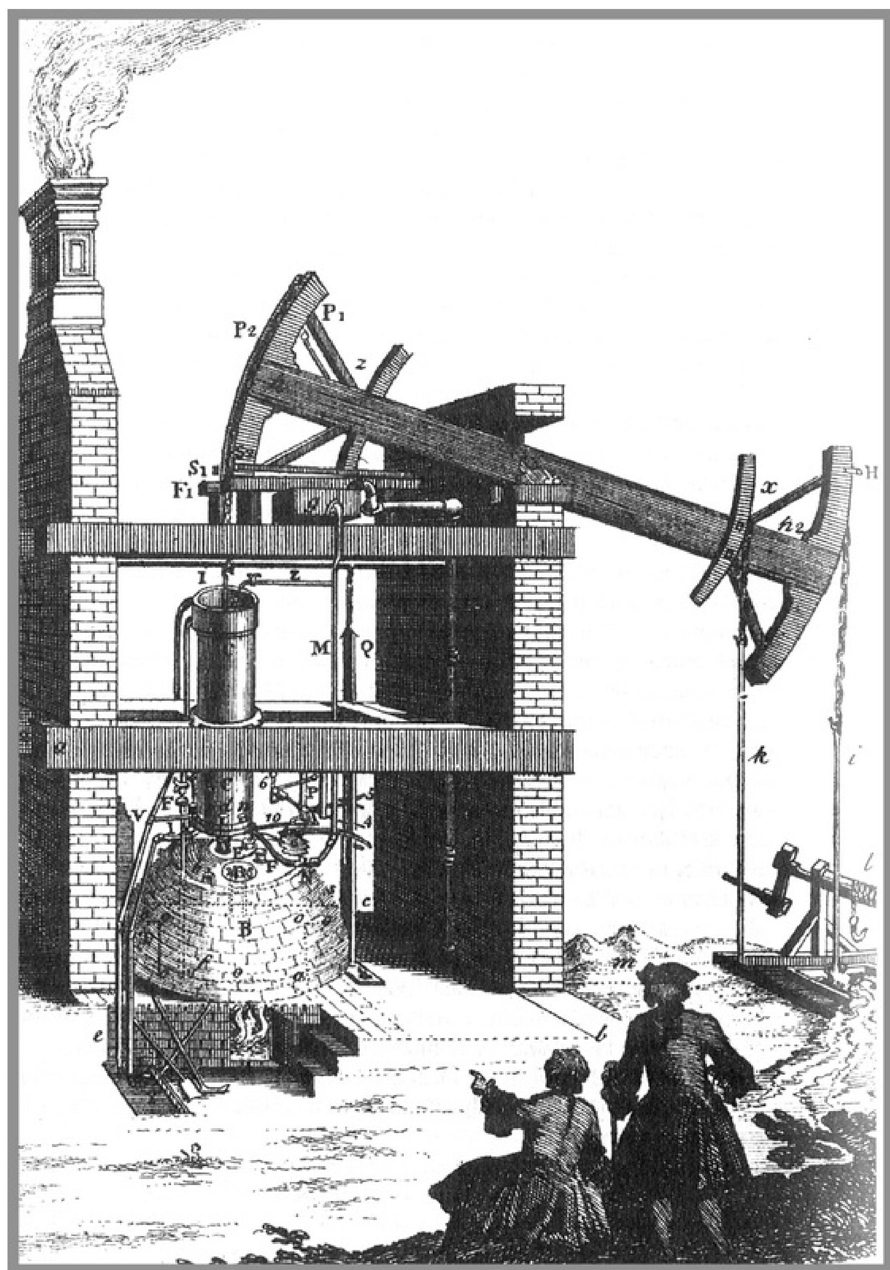
Black nació en Burdeos el 16 de abril de 1728, justo un año después de la muerte de Newton. Este hecho, por sí solo, da una idea de cómo eran los vínculos culturales entre las distintas partes de Europa en aquella época. El padre de Black, John, había nacido en Belfast, pero era de ascendencia escocesa, y se estableció en Burdeos como comerciante de vinos. Dado el estado en que se encontraban las carreteras que unían Escocia con el sur de Inglaterra durante los siglos XVII y XVIII, el modo más fácil de viajar desde Glasgow o Edimburgo, o desde Belfast, hasta Londres era hacerlo por mar y, una vez que se había subido a un barco, era casi igual de fácil llegar hasta Burdeos. Además, por supuesto, existía una conexión histórica reciente entre Escocia y Francia, la *Auld Alliance,* que databa de la época en que Escocia era un país independiente y consideraba a Inglaterra su enemigo natural. Un caballero o comerciante escocés como John Black se sentía en Francia como en su propia casa, igual que si estuviera en Gran Bretaña. En Francia, se casó con

Margaret Gordon, hija de otro escocés expatriado, y de su unión tuvieron trece hijos —ocho hijos varones y cinco hijas— y todos ellos vivieron hasta la edad adulta, lo cual era, desde luego, inusual en aquella época.

Además de una casa en la ciudad —en el barrio Chartron de Burdeos—, la familia Black poseía una granja y una casa de campo con un viñedo. Joseph creció en este entorno confortable y fue educado sobre todo por su madre, hasta que cumplió los 12 años y le enviaron a Belfast para que viviera con unos parientes, asistiendo allí a una escuela con el fin de prepararse para ser admitido en la Universidad de Glasgow, en la que entró en 1746. Al principio, Black estudió idiomas y filosofía, pero en 1748, dado que su padre le pedía que optara por una profesión, cambió a los estudios de medicina y anatomía, a los cuales se dedicó durante tres años, siendo alumno de William Cufien (1710-1790), que era entonces el catedrático de medicina de aquella universidad. Las clases de Cufien incluían química, siendo este profesor un maestro excelente con un conocimiento actualizado de la ciencia al nivel en que ésta se encontraba en aquella época. Además, Cufien hizo por su parte una importante contribución cuando demostró que era posible conseguir temperaturas muy bajas cuando el agua u otros fluidos se evaporaban. Utilizando una bomba de aire para conseguir que los líquidos se evaporaran a baja presión y producir así frío, Cufien, ayudado por un tal doctor Dobson, que era uno de sus discípulos, inventó lo que de hecho fue el primer frigorífico. Después de superar los exámenes de medicina en Glasgow, Black se trasladó a Edimburgo, en 1751 o 1752, para llevar a cabo las investigaciones que le llevarían a obtener su título de doctor. Estas investigaciones fueron las que darían lugar a su más famosa contribución a la ciencia.

En aquella época, había una gran preocupación entre la clase médica en relación con el uso de remedios de curanderos para

aliviar los síntomas que producía la existencia de «piedras» en el sistema urinario (cálculos urinarios). Entre estos remedios, cuyo objeto era disolver las piedras que estaban produciendo malestar al paciente, había brebajes que desde un punto de vista moderno parecen asombrosamente fuertes, tales como potasa cáustica y otros álcalis también potentes; sin embargo, estaban muy de moda, siguiendo el aval dado, pocos años atrás, a uno de estos remedios por Robert Walpole, el primer «primer ministro» británico, que estaba convencido de que dicho remedio le había curado. Cuando Black era todavía estudiante de medicina, un álcali suave, conocido como magnesia blanca, había sido aceptado en la medicina como tratamiento para la «acidez» de estómago. Para su tesis doctoral, Black decidió investigar las propiedades de la magnesia blanca, con la esperanza de descubrir que podría ser un tratamiento aceptable para las piedras. Esta esperanza se desvaneció, pero fue el modo de que Black llevara a cabo unas investigaciones que abrían el camino hacia un estudio verdaderamente científico de la química y que le llevaron a descubrir lo que ahora conocemos como dióxido de carbono, demostrando por primera vez que el aire está formado por una mezcla de gases y no por una sustancia única.



21. La máquina de Newcomen.

Para situar todo esto en perspectiva, hay que decir que los químicos de los tiempos de Black reconocían dos tipos de álcali: suave y cáustico. Los álcalis suaves podían convertirse en álcalis cáusticos si se hervían con cal apagada, y la cal apagada se obtenía a su vez apagando la cal viva con agua. La cal viva se fabricaba calentando calizas (esencialmente la creta) en un horno —y ésta es la clave, ya que se pensaba que las propiedades «cáusticas» de los materiales eran el resultado de algún tipo de material ígneo procedente del horno que entraba en la cal y se iba transmitiendo a través de los distintos procesos para producir álcalis cáusticos—. El primer descubrimiento de Black fue que la magnesia blanca, cuando se calentaba, perdía peso. Dado que no se producía líquido alguno, esto sólo podía significar que cierta cantidad de «aire» había escapado de la magnesia blanca. Entonces descubrió que todos los álcalis suaves se ponen efervescentes cuando se tratan con ácidos, pero no así los álcalis cáusticos. Por lo tanto, la causa de la diferencia entre los dos tipos de álcalis era que los álcalis suaves contenían «aire fijo», es decir, «aire» no volátil, que se podía liberar por la acción del calor o de un ácido, mientras que los álcalis cáusticos no contenían nada de esto. Dicho de otro modo, las propiedades cáusticas no son el resultado de la presencia de material ígneo.

Todo esto condujo a una serie de experimentos en los que la balanza era un instrumento clave, ya que todo se pesaba a cada paso. Por ejemplo, Black pesó una cierta cantidad de caliza antes de calentarla para producir cal viva, y también pesó esta sustancia resultante. Añadió a la cal viva una cantidad de agua, después de pesarla, para hacer cal apagada, y también pesó esta última sustancia. Luego añadió una cantidad precisa de álcali suave, que también había pesado, volviendo a convertir la cal apagada en la cantidad de caliza inicial. A partir de los cambios de peso que se producían en las distintas fases del experimento,

Black pudo determinar el peso de «aire fijo» que se ganaba o se perdía en las diversas reacciones.

En otra serie de experimentos relativos al «aire» liberado por los álcalis suaves, tales como utilizarlo para apagar una vela encendida, Black demostró que era diferente del aire ordinario, pero debía estar presente en la atmósfera, disperso en ella. En otras palabras, tal como lo diríamos actualmente, el aire es una mezcla de gases. Este descubrimiento era sensacional para la época. Todo este trabajo constituyó la base de la tesis de Black, presentada en 1754 y publicada de forma más desarrollada en 1756. De esta manera, Black no sólo obtuvo su doctorado, sino que además se hizo un nombre como químico destacado, en Escocia de forma inmediata y, al poco tiempo, en todo el mundo científico. Después de terminar sus estudios de medicina, Black comenzó a practicarla en Edimburgo, pero, al año siguiente, quedó vacante la cátedra de química en esta ciudad y William Cufien, el antiguo profesor de Black, fue nombrado para ocupar la plaza. Esto dejó una vacante en Glasgow, para la cual Cufien recomendó al que había sido su discípulo, que en 1756 se convirtió en catedrático de medicina y profesor de química de la Universidad de Glasgow, además de atender una consulta médica privada, y todo ello a la edad de 28 años. Black era un profesor concienzudo, cuyas clases magistrales eran verdaderamente absorbentes y atraían a Glasgow, y después a Edimburgo, a estudiantes de toda Gran Bretaña, Europa e incluso América,[2] y ejerció una influencia importante en la generación siguiente de científicos. Uno de sus alumnos tomó apuntes detallados de estas clases magistrales, que se publicaron en 1803 y siguieron inspirando a los estudiantes también durante el siglo XIX. Sin embargo, aunque continuó investigando, apenas publicó alguno de los resultados obtenidos. En cambio, sí que los solía presentar en sus clases para los estudiantes de licenciatura o en sociedades culturales. De esta manera, lo

que aquellos jóvenes tuvieron fue realmente una butaca de primera fila, desde la cual podían presenciar las novedades de la evolución científica. Durante algunos años, Black siguió desarrollando las investigaciones iniciadas sobre los temas de su tesis doctoral, demostrando, entre otras cosas, que también en la respiración de los animales se producía aquel «aire fijo», y asimismo en los procesos de fermentación y al quemar carbón. Pero nunca llegó a hacer otros descubrimientos químicos importantes, ya que durante la década de 1760 su atención se centró casi exclusivamente en la física.

Trabajos de Black sobre la temperatura

Otra contribución importante de Black a la ciencia es la que se refiere a la naturaleza del calor. El calor era un tema que fascinaba a científicos como Cufien, Black y sus contemporáneos, no sólo por su importancia intrínseca en la química de laboratorio, sino también por el papel que desempeñaba en la incipiente Revolución Industrial. El invento de la máquina de vapor, del que hablaremos más adelante, es un ejemplo obvio, pero pensemos también en la floreciente industria del whisky que existía en Escocia, que utilizaba enormes cantidades de combustible para convertir los líquidos en vapor y tenía luego que retirar una cantidad igualmente grande de calor de los vapores para condensarlos y obtener de nuevo líquido. Existían razones eminentemente prácticas para que Black investigara estos problemas a principios de la década de 1760, aunque también es probable que su interés por lo que sucede cuando se evaporan los líquidos estuviera fomentado por su estrecha relación con Cufien. Black investigó el conocido fenómeno consistente en que, cuando se funde el hielo, se mantiene a la misma temperatura mientras el sólido se está convirtiendo en líquido. Aplicando su procedimiento cuantitativo y habitualmente meticuloso,

realizó mediciones que demostraban que el calor necesario para fundir una cantidad determinada de hielo, convirtiéndolo en agua a la misma temperatura, era la misma cantidad de calor que se necesitaba para elevar la temperatura de aquella cantidad de agua desde el punto de fusión hasta los 140° Fahrenheit [60 °C]. Black denominó calor latente al calor que el sólido absorbe mientras se funde convirtiéndose en líquido a la misma temperatura, y comprobó que era la presencia de este calor lo que hacía que el agua fuera líquida en vez de sólida —realizando una distinción crucial entre los conceptos de calor y temperatura—. De un modo similar, existe un calor latente asociado con la transición del agua líquida a vapor, o de cualquier otro líquido a su estado de vapor correspondiente, y Black investigó este fenómeno también cuantitativamente. Asimismo fue él quien dio el nombre de «calor específico» a la cantidad de calor que se necesita para aumentar en un valor determinado la temperatura de una cierta cantidad de una sustancia (según la acepción moderna sería la cantidad de calor necesaria para aumentar 1 °C la temperatura de 1 gramo de cualquier sustancia). Dado que el agua tiene siempre el mismo calor específico, si, por ejemplo, a medio kilo de agua que se encuentra a su temperatura de congelación (0 °C) se le añade otro medio kilo de agua que está a su temperatura de ebullición (100 °C), el resultado es 1 kg de agua a 50 °C, es decir, la temperatura media entre las dos temperaturas iniciales. El primer medio kilo de agua aumenta su temperatura en 50 °C, mientras que en el otro medio kilo disminuye la temperatura en una cantidad igual. Sin embargo, debido a que, por ejemplo, el hierro tiene un calor específico mucho mayor que el del agua, si se vierte medio kilo de agua a 100 °C sobre medio kilo de hierro a 0 °C, la temperatura del hierro aumentaría en mucho menos de 50 °C. Black explicó todos estos descubrimientos en el *University Philosophical Club* el 23 de abril de 1762, pero nunca los publicó por escrito de una

manera formal. Para sus experimentos sobre el vapor, Black tuvo la ayuda de un joven fabricante de instrumentos que trabajaba en la universidad, llamado James Watt, que hizo algunos aparatos para Black, al mismo tiempo que realizaba sus propias investigaciones sobre el vapor. Ambos llegaron a ser buenos amigos y nadie se sintió más gratificado que Black cuando los trabajos de Watt sobre máquinas de vapor le trajeron a éste fama y riqueza.

El propio Black se marchó de Glasgow en 1766, cuando fue nombrado catedrático de química de la Universidad de Edimburgo, donde sucedió a William Cullen. Black fue médico y amigo de Adam Smith, David Hume y el pionero de la geología, James Hutton, entre otros. Nunca se casó. En cuanto a las técnicas de química analítica que había inventado, dejó para otros el desarrollo de las mismas (que lo hizo sobre todo Antoine Lavoisier), pero pasó a la posteridad como una figura de alto nivel de la Ilustración escocesa. Aunque ocupó su cátedra hasta morir, Black fue debilitándose cada vez más hacia el final de su vida y dio su última serie de clases magistrales durante el curso académico 1796-1797. Tuvo una apacible muerte, acaecida el 10 de noviembre de 1799, a los 71 años de edad.

La máquina de vapor: Thomas Newcomen, James Watt y la revolución industrial

Aunque este libro no es una historia de la tecnología, al igual que no es una historia de la medicina, vale la pena examinar brevemente los logros de James Watt, el amigo de Black, porque estos logros fueron un paso especialmente significativo hacia el tipo de sociedad en que vivimos actualmente, una sociedad basada en la ciencia. El aspecto especial del caso de Watt es que fue la primera persona que tomó unas cuantas ideas que estaban en el filo de lo que era la investigación científica en su

tiempo y las aplicó para realizar un avance tecnológico importante. El hecho de que estuviera trabajando en una universidad, en contacto directo con los investigadores que estaban logrando notables avances científicos,[3] fue un precedente del modo en que trabajan las industrias modernas de alta tecnología, que disponen de laboratorios estrechamente relacionados con la investigación. En la segunda mitad del siglo XVIII, las mejoras que hizo Watt en la máquina de vapor fueron realmente de alta tecnología; fue el estilo global del proyecto de Watt el que señaló el camino para el desarrollo de la tecnología durante los siglos XIX y XX.

Watt nació en Greenock, Clydeside, el 19 de enero de 1736. Su padre, que se llamaba también James, fue un carpintero naval que había diversificado sus actividades para ser también abastecedor de buques, constructor, naviero y comerciante, con lo cual podía construir un barco, equiparlo, proveer una carga y enviarlo para que el cargamento se vendiera en un puerto extranjero. La madre, Agnes, había tenido tres hijos antes de que naciera el joven James, pero todos ellos murieron jóvenes; un quinto hijo, John, nació tres años después de James y sobrevivió a la infancia, pero desapareció en el mar siendo aún joven, cuando navegaba en un barco de su padre.

El joven James Watt fue criado en un ambiente confortable y recibió una buena educación básica en la escuela local, aunque sufría de migrañas y se le consideraba delicado físicamente; mostraba más interés por el taller de su padre que por la escuela y realizaba modelos con funcionamiento real de distintas máquinas, así como otros artilugios, entre otros un organillo. No fue enviado a la universidad porque la intención de su padre era que se hiciera cargo del negocio naval y naviero de la familia. Sin embargo, como resultado de una serie de quiebras de negocios que afectaron a la red de intereses de James padre, estos planes de futuro se esfumaron y, cuando le faltaban un

par de años para cumplir los veinte, el joven James tuvo que enfrentarse de repente a la perspectiva de tener que buscar por sí mismo un modo de ganarse la vida. En 1754 fue a Glasgow para aprender el oficio de fabricante de instrumentos matemáticos y, más tarde, se trasladó a Londres, donde, a cambio de su trabajo y del pago de una tasa de 20 guineas, uno de los mejores fabricantes de instrumentos del país le dio un curso acelerado, una especie de aprendizaje comprimido, durante un año. Regresó a Escocia en 1756 con la intención de empezar con un negocio en Glasgow, pero se lo impidieron los poderosos gremios de artesanos, alegando que no había realizado un aprendizaje tradicional; sin embargo, al año siguiente, le concedieron un taller y alojamiento dentro del recinto universitario, donde se convirtió en fabricante de instrumentos matemáticos para la universidad, pudiendo también aceptar trabajos particulares. La universidad tenía poder para hacer lo que quisiese dentro de sus propias instalaciones, y una de las cosas que ciertamente disgustaban a personas como Adam Smith, que entonces ocupaba una cátedra en Glasgow, era el modo en que los gremios ejercían su poder.

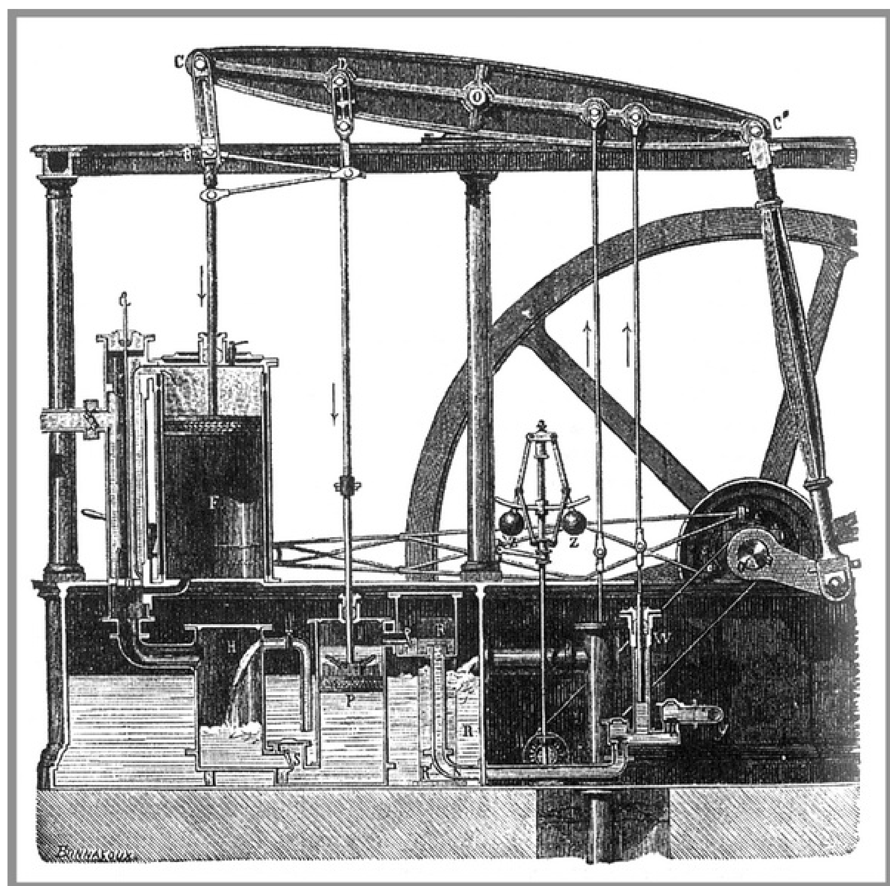
Watt, más o menos, se ganaba la vida en su nuevo puesto de trabajo y tuvo tiempo para dedicarse a hacer algunos experimentos con la fuerza del vapor, animado sobre todo por uno de los alumnos que estudiaban entonces en Glasgow, John Robinson, quien, en 1759, sugirió a Watt la posibilidad de que la fuerza del vapor sirviera para impulsar un carruaje. Aunque estos experimentos no dieron resultado alguno, sí parece que Watt tenía ya una idea de lo que podría ser la máquina de vapor cuando le pidieron, durante el invierno de 1763-1764, que reparara un modelo con funcionamiento real de la máquina de Newcomen, que la universidad había adquirido y que presentaba el problema de que, siendo de funcionamiento real, sin embargo no funcionaba.

Thomas Newcomen (1664-1729) y su ayudante John Calley habían construido en 1712 la primera máquina de vapor que funcionó correctamente. La habían instalado en una mina de carbón cerca de Dudley Castle, en la región central de Inglaterra. Aunque otras personas habían experimentado ya anteriormente con la fuerza del vapor, ésta fue la primera máquina que se pudo utilizar para realizar un trabajo útil, achicando por bombeo el agua de la mina. La característica principal del diseño de Newcomen era que contenía un cilindro vertical con un émbolo, construido de tal manera que el émbolo se encontraba unido a un contrapeso mediante una viga. En condiciones normales, el peso cae y levanta el émbolo hasta el extremo superior del cilindro. Para hacer que la máquina funcione, el cilindro que está debajo del émbolo se llena de vapor. A continuación, se rocía con agua fría el interior del cilindro, haciendo que el vapor se condense, con lo que se crea un vacío parcial. La presión atmosférica impulsa el émbolo hacia abajo, entrando éste en el espacio vacío, a pesar del contrapeso. Cuando el émbolo llega a la parte inferior del cilindro, se deja que el vapor vuelva a entrar por debajo del émbolo igualando la presión, o incluso aumentándola ligeramente por encima de la presión atmosférica, aunque esto no es necesario, de tal forma que el contrapeso pueda levantar de nuevo el émbolo hasta la parte superior del cilindro. Después, este ciclo se repite una y otra vez.[4]

Después de haber reparado los mecanismos de aquel modelo de la máquina de Newcomen, Watt se dio cuenta de que, cuando se avivaba el fuego y el pequeño calentador de agua de la máquina se llenaba de vapor, éste se agotaba del todo en muy pocos recorridos del émbolo, aunque se suponía que era un modelo a escala perfecto de una máquina que tendría que funcionar durante mucho más tiempo. Watt constató que esto se debía a lo que se conoce como efecto de escala —Isaac Newton había señalado en su *Opticks* que un objeto pequeño pierde ca-

lor más rápidamente que uno grande que tenga la misma forma; la razón es que el calor escapa a través de la superficie y que cuanto más pequeño es un objeto, mayor es la superficie en proporción a su volumen, que es el que almacena el calor. Sin embargo, en vez de limitarse a encogerse de hombros y aceptar que el modelo a escala nunca podría funcionar igual de bien que la máquina real, Watt comenzó a examinar detenidamente los principios científicos en que se basaba el funcionamiento de la máquina, para ver si conseguía aumentar su eficacia— teniendo en cuenta que, en consecuencia, las mejoras valdrían asimismo para que las máquinas de vapor de tamaño real fueran mucho más eficientes que las máquinas de Newcomen.

Watt constató que, en la máquina de Newcomen, la mayor pérdida de calor era la que resultaba de la necesidad de enfriar todo el cilindro en cada recorrido del émbolo (al ser de metal, dicho cilindro tenía un elevado calor específico), y calentarlo luego de nuevo hasta por encima de la temperatura de ebullición del agua, para poder llenarlo otra vez de vapor. Se dio cuenta de que la solución era utilizar dos cilindros, uno de los cuales se mantenía caliente durante todo el recorrido del émbolo, mientras que el otro se mantenía frío durante todo el tiempo (en los primeros modelo esto se hacía sumergiéndolo en un depósito de agua). Cuando el émbolo estaba en el punto más alto de su recorrido, se abría una válvula para que el vapor fluyese del cilindro caliente al cilindro frío, donde se condensaba, creando así el vacío parcial que era necesario. En la parte inferior del recorrido, esta válvula se cerraba y otra válvula se abría, dejando que un vapor más frío entrara en el cilindro que aún estaba caliente. Había muchas otras mejoras, incluido el uso de vapor caliente a presión atmosférica para impulsar el émbolo hacia abajo desde la parte superior, contribuyendo así a mantener caliente el cilindro que estaba funcionando; pero el avance fundamental fue el condensador separado.



22. La máquina de vapor de Watt.

En el transcurso de estos experimentos, Watt se encontró con el fenómeno del calor latente, unos pocos años después de que Black lo descubriera. Parece ser que no se había enterado de lo que había hecho Black (lo cual no sorprende, ya cine Black nunca publicaba cosa alguna), pero comentó sus descubrimientos con Black, el cual le puso al día, ayudándole a seguir mejorando su máquina. Lo que Wall observó fue que, si se añadía una parte de agua hirviendo a treinta partes de agua fría, el aumento en la temperatura del agua fría apenas era perceptible; pero, si una cantidad comparativamente pequeña de vapor (a la misma temperatura que el agua hirviendo, por supuesto) se

mezcla con el agua fría, pronto hace que el agua hierva (ahora sabemos que se debe a que el calor latente que se libera en forma de vapor[5] se condensa convirtiéndose en agua).

Watt patentó su máquina de vapor en 1769, pero no fue un éxito comercial inmediatamente; su ocupación principal entre 1767 y 1774 fue el trabajo de supervisor de los canales escoceses, incluido el canal de Caledonia. Se había casado en 1763, pero su primera esposa. Margaret, falleció en 1773, dejándole dos hijos, y en 1774. Watt se traslado a Birmingham, donde formó parte de un grupo con inquietudes científicas conocido como la Lunar Society (porque se reunían una vez al mes), en el que estaban también Joseph Priestley, Josiah Wedgwood y Erasmus Darwin (estos dos últimos eran los abuelos de Charles Darwin). Fue en Birmingham donde Watt se asoció con Matthew Boulton (1728-1809), a quien había conocido por mediación de Erasmus Darwin, y esta asociación fue lo que les condujo al éxito comercial de sus máquinas de vapor. Watt también inventó y patentó muchos detalles para mejorar las máquinas, como, por ejemplo, un regulador automático para cerrar la entrada de vapor si la máquina estaba funcionando con demasiada rapidez. Watt se volvió a casar en 1775 y tuvo un hijo y una hija con su segunda esposa, Ann. Se retiró de sus negocios de máquinas de vapor en 1800, a los 64 años de edad, pero siguió diseñando inventos hasta su muerte, acaecida en Birmingham el 25 de agosto de 1819.

Experimentos con la electricidad: Joseph Priestley

Del mismo modo que Watt desarrolló la máquina de vapor basándose en principios científicos, también la importancia del vapor en la revolución industrial fomentó el desarrollo continuado del estudio de la relación existente entre el calor y el movimiento (termodinámica) en el siglo XIX. A su vez, esto lle-

vó al desarrollo de máquinas más eficientes, por lo que tenemos aquí un ejemplo clásico de simbiosis entre ciencia y tecnología. Sin embargo, mientras Boulton y Watt desempeñaban su papel dentro de la Revolución Industrial durante el último cuarto del siglo XVIII, uno de sus amigos de la Limar Society, Joseph Priestley, daba el siguiente gran paso hacia adelante dentro de la química —a pesar de que la ciencia estaba lejos de ser lo más importante en su vida.

Priestley nació en Fieldhead, cerca de Leeds, el 13 de marzo de 1733. Su padre, James, que era tejedor y también hacía ropas, trabajaba en sus telares en la misma casa en que vivía.[6] James Priestley era calvinista. Su esposa, Mary, dio a luz a seis hijos en seis años y luego murió durante el invierno excepcionalmente duro de 1739-1740. Joseph nació el primero y, como sus hermanos iban llegando en una rápida sucesión, fue enviado a vivir con su abuelo materno y apenas conoció a su madre. Al morir ésta, volvió a la casa paterna, pero a James le resultó imposible hacerse cargo de todos los niños y del trabajo al mismo tiempo, por lo que Joseph, que entonces tenía alrededor de 8 años, fue a vivir con una tía que no tenía hijos y cuyo marido murió poco después de que el niño llegara a la casa. La tía de Joseph era también calvinista y además muy practicante de su religión, por lo que se aseguró de que el muchacho recibiera una buena educación en las escuelas locales (en las que todavía se enseñaba sobre todo latín y griego) y le animó para que siguiera la carrera eclesiástica y se hiciera pastor de la Iglesia calvinista.

A pesar de ser tartamudo, Priestley consiguió su objetivo. En 1752 fue a estudiar a una academia no conformista. Estas academias (que no eran necesariamente tan grandes como su nombre sugiere —algunas estaban formadas por un par de maestros y un grupito o dos de alumnos—) tenían su origen en la misma Ley de Uniformidad de 1662 que había llevado a John

Ray a abandonar Cambridge. Cuando alrededor de dos mil no conformistas fueron expulsados de sus parroquias como resultado de esta ley, la mayoría de ellos se convirtieron en profesores particulares (como hizo en realidad el propio Ray), pues ésta era la única posibilidad que tenían para ganarse la vida. En 1689, después de la Revolución Gloriosa, se promulgó una Ley de Tolerancia que permitió a los no conformistas desempeñar un papel más amplio en la sociedad y fundar unas cuarenta academias dedicadas a la formación de pastores de la iglesia no conformista. Por razones religiosas obvias, estas academias mantenían en general buenas relaciones con las universidades escocesas y muchos de sus alumnos fueron a estudiar a las de Glasgow y Edimburgo. Las academias florecieron a mediados del siglo XVIII y contaron, entre otros, con alumnos de la talla de Daniel Defoe, Thomas Malthus y William Hazlitt, pero posteriormente empezaron a declinar a medida que los no conformistas se iban integrando plenamente en la sociedad y recibieron de nuevo permiso para enseñar en escuelas y *colleges* de la red principal.

En 1755, tras terminar sus estudios, Priestley ejerció como pastor calvinista en Needham Market, Suffolk, donde espantó a muchos de sus parroquianos por ser arriano —por decirlo así, era un no conformista inconformista. Comenzó con unas opiniones más o menos ortodoxas sobre la Trinidad, pero, mientras estaba en Needham Market, después de hacer su propio estudio detallado de la Biblia, se convenció de que la idea de la Santísima Trinidad era absurda y se hizo arriano. Desde Needham Market, Priestley se trasladó a Nantwich, Cheshire, y posteriormente fue a enseñar a la Warrington Academy, situada a medio camino entre Liverpool y Manchester. Fue allí donde se casó con Mary Wilkinson, la hermana de John Wilkinson, un fabricante de hierro que hizo una fortuna con los armamentos; la pareja tuvo tres hijos y una hija. En gran medida gracias a

Priestley, la Warrington Academy fue una de las primeras instituciones de enseñanza inglesas que sustituyó el tradicional estudio de la cultura clásica por clases de historia, ciencia y literatura inglesa.

Los intereses intelectuales de Priestley eran de amplio espectro, figurando entre sus primeras obras escritas una gramática inglesa y un esquema biográfico que establecía las relaciones cronológicas entre figuras importantes de la historia, abarcando el período comprendido entre el año 1200 a. C. y el siglo XVIII. Fue una obra tan impresionante que, en 1765, se le concedió a Priestley el título de doctor en Leyes por la Universidad de Edimburgo. Aquel mismo año, durante una visita a Londres (adoptó la costumbre de pasar un mes en Londres cada año), Priestley conoció a Benjamín Franklin y a otros científicos interesados por la electricidad (llamados entonces electricistas), que le animaron a realizar sus propios experimentos. En uno de éstos, Priestley demostró que no hay fuerza eléctrica en el interior de una esfera hueca cargada. Sugirió, entre otras cosas, que la electricidad obedecía a una ley del inverso del cuadrado y, gracias a esta obra, resultó elegido miembro de la Royal Society en 1766. Cuando ya había escrito seis libros sobre temas no científicos, escribió también una historia de la electricidad, que se publicó en 1767, contenía unas 250 000 palabras y le consagró como profesor e historiador de la ciencia. Tenía entonces 34 años, pero todos los logros que había alcanzado hasta el momento eran sólo un mero indicio de lo que estaba por llegar.

Aunque, en términos relativos, la ciencia era tan sólo una parte secundaria de la vida activa y plena de Priestley, no disponemos de espacio en este libro para situar ésta en su propio contexto, y únicamente podemos esbozar el papel que desempeñó como teólogo y discrepante radical en las décadas turbulentas de finales del siglo XVIII. En 1767, Priestley volvió a tra-

bajar como pastor en un templo de Leeds. Al mismo tiempo que se desarrollaba su interés por la química, escribía panfletos criticando la forma en que el gobierno británico trataba a las colonias americanas,[7] y continuaba su búsqueda de la verdad religiosa, inclinándose hacia las opiniones de los «unitarios», una secta profundamente arriana que sería fundada en 1774. La fama de Priestley se extendió y, hacia el final de su estancia en Leeds en 1773, fue invitado por el político *whig* lord Shelburne para que trabajara como su «bibliotecario» con un sueldo de 250 libras esterlinas al año, además de alojamiento gratuito en una casa situada en la finca de Shelburne mientras durara el empleo y una pensión vitalicia cuando dejara de prestar sus servicios. El trabajo de bibliotecario le ocupaba muy poco tiempo, siendo en realidad sus funciones principales la de consejero político y portavoz intelectual de Shelburne, además de trabajar a tiempo parcial como tutor de los dos hijos del lord, lo cual le dejaba horas libres para sus trabajos científicos, subvencionados en gran medida por Shelburne, y para otros intereses propios. Como secretario de Estado, cargo que ejerció desde 1766 (cuando tenía sólo 29 años) hasta 1768, Shelburne había intentado fomentar una política de conciliación con respecto a las colonias americanas, pero el rey Jorge III le pagó sus esfuerzos destituyéndole. En 1782, después de que su desastrosa política hubiera provocado la derrota de Gran Bretaña en la guerra de Independencia americana, el rey no tuvo más remedio que recurrir a Shelburne por ser éste el único estadista que tenía la credibilidad necesaria para poder llevar a cabo la difícil tarea de establecer la paz con las antiguas colonias. Pero para entonces Priestley se había marchado. Ya en 1780, sus manifestaciones abiertas como disidente habían llegado a convertirle en un estorbo político incluso para lord Shelburne, que jubiló a su «bibliotecario» pagándole la pensión prometida de 150 libras esterlinas anuales. Priestley se trasladó a Birmingham, donde se

alojó en una vivienda que le había facilitado su rico cuñado, trabajó como pastor de la Iglesia y, de un modo u otro, vivió bastante confortablemente. Durante este período de su vida fue miembro activo de la Lunar Society.

En Birmingham, Priestley continuó haciendo declaraciones en contra de la Iglesia de Inglaterra y, del mismo modo que había simpatizado con la causa de los habitantes de las colonias americanas, declaró abiertamente sus simpatías por la Revolución Francesa (que inicialmente fue un movimiento popular democrático). Las cosas llegaron a un punto crítico cuando Priestley y otros partidarios del nuevo gobierno francés organizaron una cena en Birmingham para celebrar el segundo aniversario de la toma de la Bastilla. Sus contrarios (competidores políticos o económicos ansiosos de encontrar una oportunidad para atacar a sus rivales) organizaron un tropel de chusma que primero se dirigió al hotel donde se había celebrado la cena, pero luego, tras comprobar que los comensales se habían ido ya, se dedicaron a causar destrozos, quemando y saqueando las casas y los templos de los disidentes. Priestley escapó a tiempo, pero su casa fue destrozada, junto con su biblioteca, sus manuscritos y su equipamiento científico. Priestley se trasladó a Londres, intentando al principio resistir y luchar verbalmente por su causa, pero su posición se volvió insostenible cuando la Revolución Francesa se convirtió en un desorden sangriento y la hostilidad contra Francia se reavivó a causa de la guerra (a su posición en Inglaterra le hizo un flaco favor el hecho de que los revolucionarios de París le ofrecieran la nacionalidad francesa). En 1794, cuando Priestley tenía ya 61 años, emigró junto con su esposa a Norteamérica, siguiendo a sus hijos, que habían emigrado el año anterior. Todavía se las arregló para publicar treinta obras después de 1791, mientras vivía tranquilamente en Northumberland, Pennsylvania. Falleció allí el 6 de febrero de 1804.

Como químico, Priestley era un gran experimentador y un teórico malísimo, Cuando comenzó sus trabajos, sólo se conocía la existencia de dos gases (o «aires»): el aire propiamente dicho, del que, a pesar de los trabajos de Black, todavía no se sabía que era una mezcla de gases, y el dióxido de carbono (o «aire fijo»). El hidrógeno (o «aire inflamable») fue descubierto por Henry Cavendish en 1776. Priestley identificó otros diez gases, entre los cuales figuran (con sus nombres actuales) el amoníaco, el ácido clorhídrico, el anhídrido nitroso (gas de la risa) y el dióxido de azufre. Su descubrimiento más importante, por supuesto, fue el oxígeno —pero, a pesar de que realizó experimentos que ponían de manifiesto la existencia del oxígeno como un gas en sí mismo, explicó dichos experimentos según la teoría del flogisto, que había sido propuesta por el químico alemán George Stahl (1660-1734). Esta teoría «explicaba» la combustión como el efecto producido por el hecho de que una sustancia llamada flogisto abandonase el cuerpo al producirse la combustión de éste. Por ejemplo, según la terminología moderna, en la combustión de un metal éste se combina con oxígeno para formar un óxido metálico, una sustancia que en los tiempos de Priestley se denominaba *calx*.[*] Según la teoría del flogisto, lo que sucedía era que el flogisto escapaba del metal y dejaba el óxido metálico. Según esto, cuando el óxido metálico se calienta, el flogisto se vuelve a combinar con él (o, más bien, vuelve a entrar en él) para formar el metal. La razón por la cual no se produce la combustión de un cuerpo en ausencia de aire, según Stahl, es que el aire es necesario para absorber el flogisto.

La teoría del flogisto funcionó, siguiendo una moda, mientras la química fue una ciencia vaga y cualitativa. Pero, en cuanto Black y sus sucesores empezaron a realizar mediciones precisas de todo aquello que participaba o resultaba de una reac-

ción química, la teoría del flogisto se vio condenada a desaparecer, ya que sólo podía ser cuestión de tiempo que alguien se diera cuenta de que los cuerpos son más pesados después de la combustión, y no más ligeros, lo cual sugiere que algo entra en (o se combina con) ellos, en vez de liberarse saliendo de ellos. Lo sorprendente es que Priestley no se diera cuenta de esto (aunque habría que recordar que sólo era químico a tiempo parcial y tenía muchas otras cosas en su cabeza), de modo que quedó para el francés Antoine Lavoisier la tarea de establecer la relación entre la combustión y el oxígeno, que derribó los cimientos de la teoría del flogisto.

Priestley comenzó sus experimentos sobre los «aires» durante la época que pasó en Leeds, donde vivía cerca de una fábrica de cerveza. El aire que se encontraba directamente sobre la superficie del líquido que fermentaba en las cubas se había identificado recientemente como el «aire fijo» de Black, y Priestley se dio cuenta de que allí tenía un laboratorio ya preparado, en el que podía experimentar con grandes cantidades de este gas. Descubrió que el gas formaba una capa de aproximadamente 23-30 cm de espesor sobre el líquido en fermentación y que, aunque una vela encendida se apagaba al situarla dentro de esta capa, el humo se quedaba allí. Añadiendo humo a la capa de dióxido de carbono, Priestley hizo que este gas fuera visible, de tal modo que se pudiera observar ondas en su superficie (la frontera entre el dióxido de carbono y el aire limpio) y se viera cómo fluía sobre el borde de la cuba y caía al suelo. Priestley experimentó disolviendo aire fijo procedente de las cubas en agua y descubrió que, lanzando agua hacia atrás y hacia adelante de un recipiente a otro dentro del aire fijo durante unos pocos minutos, podía producir una agradable bebida efervescente. A principios de la década de 1770, en parte como resultado de un intento fracasado de encontrar un medio para prevenir el escorbuto,[8] Priestley consiguió refinar esta

técnica obteniendo dióxido de carbono a partir de la caliza utilizando ácido sulfúrico y disolviendo después el gas en agua a presión. Como resultado de esto surgió una pasión por la «soda», que se extendió a toda Europa. Aunque Priestley no buscaba compensaciones económicas por su innovación, se hizo justicia, ya que a causa de este invento lord Shelbume oyó por primera vez hablar de Priestley mientras viajaba por Italia en 1772. Puesto que fue Shelburne quien hizo que Priestley tuviera tiempo para dedicarse más intensamente a la química durante los años siguientes, y quien le facilitó el lugar (su propiedad de Calne, en Wiltshire) y el dinero para los experimentos que le llevarían a descubrir el oxígeno, bien se podría decir que este descubrimiento debe mucho a la industria cervecera.

El descubrimiento del oxígeno

Mientras estaba en Leeds, Priestley comenzó también a sospechar que el aire no era una sustancia simple. Realizando experimentos con ratones descubrió que la capacidad del aire para mantener la vida podía «agotarse» se algún modo con la respiración, porque el aire podía llegar a no ser adecuado para respirar; sin embargo, la respirabilidad del aire se podía restablecer mediante la presencia de plantas —fueron los primeros indicios del proceso de fotosíntesis, en el que el dióxido de carbono se descompone y se libera oxígeno. Pero Priestley descubrió el oxígeno, es decir, el gas que se agota durante la respiración, estando en Calne, el 1 de agosto de 1774, cuando calentó óxido rojo de mercurio concentrando los rayos solares mediante una lente de 12 pulgadas de diámetro (unos 30 cm) sobre una muestra contenida en un recipiente de cristal. Cuando aquel óxido dio lugar a la forma metálica del mercurio, se liberó un gas (lo que Priestley y sus contemporáneos llamaban un «aire»). Pasó cierto tiempo hasta que Priestley descubrió que

aquel nuevo «aire» que había fabricado era mejor que el aire ordinario para la respiración. En el transcurso de una larga serie de experimentos, descubrió en primer lugar que una vela encendida sumergida en aquel gas llameaba con un brillo inusual, y finalmente, el 8 de marzo de 1775, introdujo un ratón adulto en un recipiente sellado lleno del nuevo «aire». Priestley sabía por sus experimentos que un ratón de aquel tamaño podía vivir durante un cuarto de hora en la misma cantidad de aire ordinario; sin embargo, este ratón correteó en el recipiente durante media hora y luego, cuando ya lo habían sacado del recipiente, aparentemente muerto, revivió en cuanto entró en calor junto al fuego. Por precaución, admitiendo la posibilidad de haber elegido un ratón extraordinariamente resistente, Priestley, en sus anotaciones relativas al experimento, escribió tan sólo que aquel nuevo aire era al menos tan bueno como el aire ordinario; no obstante, otros experimentos posteriores demostraron que, en cuanto al mantenimiento de la respiración, el nuevo aire era entre cuatro y cinco veces mejor que el aire ordinario. Esto concuerda con el hecho de que sólo alrededor del 20 por 100 del aire que respiramos es realmente oxígeno.

En realidad, el químico sueco Cari Scheele (1742-1786) tenía un derecho preferente sobre el descubrimiento de Priestley, ya que se conservan unas anotaciones de laboratorio realizadas por Scheele en las que éste constata que en 1772 se había dado cuenta de que el aire era una mezcla de dos sustancias, una de las cuales evita la combustión, mientras que la otra la induce. Mediante otras técnicas diferentes, había preparado muestras del gas que fomenta la combustión cuando se calienta el óxido de mercurio, pero no se apresuró a publicar este descubrimiento inmediatamente —escribió sobre ello en un libro que preparó en 1773, pero que no publicó hasta 1777—. Las noticias relativas a estos trabajos no se difundieron en el mundo científico hasta poco antes de que Priestley llevara a cabo sus experimen-

tos en agosto de 1774. Parece ser que Priestley desconocía el descubrimiento de Scheele en aquella época, pero en septiembre de 1774, mientras Priestley estaba todavía realizando sus experimentos, Scheele escribió sobre los que había hallado en una carta dirigida a Lavoisier. Scheele hizo otros muchos descubrimientos de gran importancia para la química, pero trabajó como farmacéutico, publicó sólo un libro y rechazó varias ofertas de cargos académicos. Además, murió joven, a los 43 años de edad. Esta combinación de circunstancias ha tenido como consecuencia que a veces se pase por alto su obra cuando se habla de la historia de la química en el siglo XVIII. Sin embargo, con respecto al descubrimiento casi simultáneo del oxígeno por parte de Scheele y de Priestley lo realmente importante no es quién lo hizo primero, sino el hecho de que lo sucedido nos recuerda que en la mayoría de los casos la ciencia progresa mediante pasos sucesivos, construyendo sobre lo que ya se ha descubierto, y utilizando los medios tecnológicos del momento, por lo que, en gran medida, es una cuestión de suerte que sea un individuo u otro quien haga primero un descubrimiento y consiga que su nombre quede inscrito en el libro de la historia. Para bien o para mal, es el nombre de Priestley el que está asociado con el descubrimiento del oxígeno, aunque indudablemente fuera Scheele quien lo descubrió primero, e incluso a pesar de que Priestley continuara explicando sus descubrimientos haciendo referencia a la teoría del flogisto.

Sin embargo, sólo sucede ocasionalmente que un descubridor no consiga que su nombre vaya ligado en los libros de historia a un descubrimiento concreto, o a la formulación de una ley, porque nunca se preocupó de hablar con nadie sobre su trabajo y porque se sintiera satisfecho en el aspecto científico con el mero hecho de realizar experimentos para saciar su curiosidad personal. El ejemplo típico de esta rara especie de científico es Henry Cavendish, un contemporáneo de Priestley,

que publicó lo suficiente para convertirse en una figura importante en el desarrollo de la química durante la segunda mitad del siglo XVIII, pero «no» publicó una gran cantidad de resultados (especialmente en física) que durante el siglo siguiente fueron descubiertos independientemente por otros científicos (cuyos nombres aparecen en los libros de historia debidamente ligados a sus descubrimientos). No obstante, había razones extraordinarias de tipo familiar, sobre todo su gran fortuna, por las que, cualesquiera que fueran sus inclinaciones, Cavendish estaba en buena situación para dedicarse a ellas y también para seleccionar y elegir lo que quería publicar cuando se le planteaba esta decisión.

Cavendish procedía, no de una, sino de dos de las más ricas e influyentes familias aristocráticas que había en Inglaterra en aquella época. Su abuelo paterno fue William Cavendish, el segundo duque de Devonshire, y su madre, Anne de Grey, era hija de Henry de Grey, duque de Kent (y duodécimo conde, que fue ascendido al rango de duque en 1710). Como cuarto de cinco hermanos varones (había también seis hermanas), el padre de Henry, Charles Cavendish (1704-1783), no tenía ningún gran título propio, pero la posición de la familia Cavendish era tal que Charles fue conocido durante toda su vida como lord Cavendish. Si hubiera sido realmente un lord, su hijo Henry habría sido el Honorable Henry Cavendish, Esquire, del mismo modo que Robert Boyle, hijo de un conde, había sido «el Honorable». De hecho, Henry Cavendish recibió este tratamiento mientras vivió su padre, pero, en cuanto su padre murió, hizo saber que prefería ser llamado sencillamente Henry Cavendish, Esquire.

Ambas ramas de la familia tenían interés por la ciencia. A partir de 1736, durante diez años o más, el duque de Kent y su familia fomentaron la realización de trabajos de física y astronomía, sobre todo dando al astrónomo Thomas Wright (de cu-

ya obra hablaremos en el Capítulo 8) un empleo como preceptor de la duquesa y dos de las hijas del duque, Sophia y Mary, aunque no de Anne, que, además de abandonar pronto el hogar, murió joven, de tuberculosis, en 1733. Wright hizo también trabajos de agrimensura en la finca y llevó a cabo observaciones astronómicas desde allí mismo, informando sobre las mismas a la Royal Society durante la década de 1730. Su trabajo docente continuó incluso después del fallecimiento del duque acaecido en 1740. Dada la relación familiar existente, tanto lord Charles como Henry Cavendish visitaron las propiedades del duque de Kent mientras Wright estaba allí (se sabe con certeza que estuvo allí al menos hasta que Henry cumplió 15 años) y necesariamente tuvieron que conocerle, por lo que es seguro que discutirían de astronomía con él.

Todo hace pensar que fue así, ya que el propio Charles Cavendish estaba tan interesado por la ciencia en aquellos momentos, hacia la mitad de su vida, que renunció al papel tradicional de los jóvenes miembros de la aristocracia —la política— para dedicarse a la ciencia. Como era de rigor, más o menos, para alguien de su posición, en 1725 Charles fue elegido miembro de la Cámara de los Comunes (un nombre de lo más inapropiado para los miembros que la componían en aquellos días), donde prestó servicios junto con uno de sus hermanos, un tío, dos cuñados y un primo hermano. Charles Cavendish fue diligente y capaz como miembro del Parlamento, y resultó ser un hábil administrador estrechamente implicado en los trabajos relacionados con la construcción del primer puente que se hizo en Westminster (el primer puente nuevo construido sobre el Támesis en Londres desde que se había construido el llamado Puente de Londres). Sin embargo, al cabo de dieciséis años, durante los cuales Robert Walpole fue primer ministro,[9] decidió que ya había cumplido suficientemente su deber para con el país y, en 1741, cuando tenía 37 años de edad y el joven

Henry tenía sólo 10, se retiró de la política para dedicarse a la ciencia. Como científico era un aficionado entusiasta, más bien en la tradición de los miembros de la Royal Society, y muy hábil para el trabajo experimental (su destreza fue alabada por Benjamin Franklin). Uno de sus trabajos más intrigantes fue la invención, en 1757, de unos termómetros que mostraban las temperaturas máxima y mínima registradas durante la ausencia del observador —lo que actualmente conocemos como termómetros de «máxima y mínima». Sin embargo, aunque no era un científico de primera categoría, Charles Cavendish pronto hizo que sus habilidades administrativas fueran muy útiles tanto para la Royal Society, de la que había sido elegido miembro justo tres meses después de la muerte de Newton, como para el Real Observatorio de Greenwich, al mismo tiempo que fomentaba la vocación de su hijo Henry.

Charles Cavendish había contraído matrimonio con Anne de Grey en 1729, cuando aún no había cumplido los 25 años, y Anne era dos años más joven que él. Los padres de ambos habían sido amigos durante años e indudablemente veían con agrado este enlace, pero carecemos de información sobre el aspecto romántico de esta relación, salvo que parecía existir amor, ya que en aquellos tiempos los hijos varones de la aristocracia normalmente no se casaban hasta después de cumplir los treinta años. Lo que sí sabemos es lo ricos que eran ambos contrayentes, porque en el contrato de matrimonio figuran todos los detalles al respecto. Charles tenía las tierras y la renta que su padre le había dado y Arme aportaba una renta, valores y la promesa de una herencia sustanciosa. Christa Jungnickel y Russell McCormmach[10] han calculado que en la época en que se casaron, además de unas propiedades considerables, Charles Cavendish disponía de una renta anual de al menos 2000 libras esterlinas, que fue aumentando con el tiempo. Hay que pensar que en aquella época 50 libras esterlinas anuales era una canti-

dad suficiente para vivir y que 500 libras esterlinas eran una renta suficiente para que un caballero pudiera llevar una vida confortable.

Anne Cavendish, como se llamó por su matrimonio, aunque habitualmente se le llamaba Lady Anne, ya había mostrado signos de lo que iba a ser su enfermedad fatal, siendo propensa a lo que se calificó de severos resfriados, pero que de manera inquietante incluía expectoraciones de sangre. En el invierno de 1730-1731, que fue muy duro, la pareja viajó al continente, visitando primero París y trasladándose después a Niza, lugar que estaba considerado como muy conveniente para las personas que convalecían de enfermedades pulmonares, con mucho sol y aire puro. Fue allí, el 31 de octubre de 1731, donde Anne dio a luz a su primer hijo, al que se bautizó como Henry por ser éste el nombre de su abuelo materno. Después de realizar otros recorridos por el continente, en parte buscando tratamiento médico para la enfermedad de Anne, la familia regresó a Inglaterra, donde el hermano de Henry, Frederick (bautizado con el nombre del príncipe de Gales), nació el 24 de junio de 1733.[11] Cuando aún no habían transcurrido tres meses, el 20 de septiembre de 1733, Anne murió. Charles Cavendish nunca volvió a casarse y, a efectos prácticos, Henry Cavendish nunca tuvo una madre, cosa que podría explicar en parte algunas de sus peculiaridades como adulto. Cinco años más tarde, en 1738, Charles Cavendish vendió sus propiedades rurales y se estableció con sus dos hijos en una casa situada en la Great Marlborough Street, en Londres, lo cual resultaba muy conveniente para sus trabajos en equipo, tanto científicos como en la administración pública.

Aunque Charles Cavendish se había educado en Eton, sus dos hijos fueron enviados a una escuela privada en Hackney y posteriormente a Peterhouse, en Cambridge, siguiendo Frederick siempre el camino que iba abriendo su hermano. Henry

llegó a Cambridge en noviembre de 1749, cuando tenía 18 años, y permaneció allí durante tres años y tres meses. Se marchó de Cambridge sin conseguir la licenciatura, como hacían muchos jóvenes caballeros de la aristocracia, pero no sin sacar provecho plenamente de lo que Cambridge podía ofrecer en cuanto a educación (que no era mucho, ni siquiera en la década de 1760). Fue después de que Henry abandonara Peterhouse cuando Frederick cayó desde la ventana de su habitación, en algún momento durante el verano de 1754, y sufrió heridas en la cabeza, que le dejaron un daño cerebral irreversible. En parte gracias al dinero de la familia, que hacía posible que tuviera siempre criados de confianza o compañeros que cuidaran de él, esto no le impidió llevar una vida independiente, pero fue la causa de que nunca pudiera seguir los pasos de su padre en el campo político, ni en el científico.

Henry Cavendish no tenía ningún interés por la política, pero estaba fascinado por la ciencia. Una vez que los dos hermanos hubieron realizado juntos el Grand Tour de Europa, Henry se estableció en la casa de Great Marlborough Street y dedicó toda su vida a la ciencia, inicialmente en colaboración con su padre. Algunos miembros de la familia criticaron esta actitud, considerándola egoísta y caprichosa, y opinaron también que no era muy decente que un Cavendish participara en experimentos de laboratorio, pero Charles Cavendish no podía, desde luego, poner objeciones a que su hijo sintiera la misma pasión que él por la ciencia. Hay varias anécdotas sobre la supuesta tacañería de Charles con respecto a Henry, pero, en la medida en que haya algo de cierto en esas historias, lo único que reflejan es que el viejo Cavendish manejaba su dinero con una prudencia que le era proverbial. Charles Cavendish estaba siempre al acecho para encontrar modos de acrecentar su fortuna y ponía cuidado en no gastar más de lo necesario —pero entendía como «necesario» lo que era adecuado para el hijo de un duque—.

Algunas historias dicen que, mientras su padre vivió, Henry recibió una asignación de tan sólo 120 libras esterlinas al año, que, por otra parte, habría sido más que adecuada, puesto que vivía en la casa familiar con todo pagado; otras historias, más plausibles, dicen que su asignación era de 500 libras al año, la misma suma que Charles Cavendish había recibido de su padre en la época en que se casó. Lo que es indudablemente cierto es que Henry Cavendish no se interesaba en absoluto por el dinero (del modo en que únicamente la gente muy rica puede sentir desinterés por el dinero). Por ejemplo, poseía sólo un traje, que vestía cada día hasta que estaba gastado, y entonces se compraba otro del mismo estilo pasado de moda. También era muy monótono en sus hábitos alimentarios, cenando casi siempre una pierna de cordero cuando estaba en su casa. En una ocasión en que varios amigos científicos estaban invitados a cenar, el mayordomo preguntó qué se debía preparar para la cena. «Una pierna de cordero», respondió Cavendish. Al decirle el mayordomo que esto no sería suficiente, Henry replicó: «Entonces prepara dos».

Pero la actitud de Henry Cavendish con respecto al dinero se ilustra mejor en el relato bien documentado de una visita que le hizo su banquero, mucho después de que Charles Cavendish hubiera muerto. El banquero estaba preocupado porque Henry había acumulado unas 80 000 libras esterlinas en su cuenta corriente y le urgió a que hiciera algo con aquel dinero. Cavendish se puso furioso porque le hubieran «molestado» con aquella pregunta fastidiosa, recordándole que era su trabajo como banquero cuidar del dinero y que si le volvía a aburrir con tales trivialidades, se llevaría su cuenta a otro sitio. El banquero, algo nervioso, continuó con la sugerencia de que quizá fuera conveniente invertir la mitad del dinero. Cavendish estuvo de acuerdo y le dijo al banquero que hiciera con el dinero lo que le pareciese mejor, pero que no volviera a «molestarle» con el asun-

to, porque, si lo hacía, cerraría la cuenta. Afortunadamente los banqueros eran honestos y colocaron aquel dinero de Cavendish en inversiones seguras, y así lo hicieron siempre en lo sucesivo con otras cantidades. Cuando murió, Henry Cavendish tenía inversiones con un valor nominal de más de un millón de libras esterlinas, aunque su valor real de mercado en aquel momento era algo inferior al millón.

La base de aquella riqueza provenía en parte del éxito que tuvo Charles Cavendish aumentando su propia fortuna, aunque también contribuyó una herencia que le llegó poco antes de morir y que formó parte del patrimonio que heredó Henry. A Frederick le dejó sólo lo suficiente para que llevara una vida confortable como caballero, porque, además de ser el hijo menor, sus problemas mentales le hacían incapaz de manejar una fortuna. Charles Cavendish tenía una prima hermana, Elizabeth, que era hija de su tío James. Elizabeth se casó con Richard Chandler, un político que era hijo del obispo de Durham; el único hermano de Elizabeth, William, se casó con otro miembro de la familia Chandler, Barbara. En 1751 murieron James y William Cavendish. Este último no dejó herederos, por lo que Elizabeth y Richard, que tomó entonces el apellido Cavendish, eran los únicos que quedaban en aquella línea de la familia y por consiguiente fueron los herederos de James Cavendish. Sin embargo, tampoco Richard y Elizabeth tuvieron hijos, y Richard murió antes que su esposa, quedando ésta como heredera de una enorme fortuna en tierras y valores mobiliarios. Cuando Elizabeth murió, en 1779, toda esta riqueza se la dejó a Charles, que era el único primo varón que aún vivía y su pariente más cercano en la familia Cavendish. Al morir Charles Cavendish, en 1783, a los 79 años de edad, la fortuna acumulada pasó a Henry, que entonces tenía 52 años. Después de esto, alguien se refirió a él llamándole «el más rico de los sabios y el más sabio entre todos los ricos».

Siguiendo la tradición familiar, en 1810, cuando Henry murió, dejó su fortuna a unos parientes cercanos, siendo el principal beneficiario George Cavendish, hijo del cuarto duque de Devonshire (que a su vez era primo hermano de Henry Cavendish) y hermano del quinto duque (la madre de George era Charlotte Boyle, hija del tercer conde de Burlington). Uno de los descendientes de George, su nieto William, se convirtió en el séptimo duque de Devonshire en 1858, cuando murió el sexto duque, que nunca se casó. Este William Cavendish, después de aumentar la fortuna familiar aún más gracias a sus negocios con el hierro y el acero, y de (entre otras cosas) prestar servicios durante nueve años como rector de la Universidad de Cambridge, fue quien aportó los fondos para construir el Cavendish Laboratory en Cambridge durante la década de 1870. William Cavendish nunca mencionó oficialmente si su intención era que el laboratorio fuera un monumento a su antepasado, pero esta denominación garantizó, como ya veremos, que el nombre Cavendish estuviera presente en la vanguardia de la investigación sobre física mientras se producían los avances revolucionarios que se produjeron a finales del siglo XIX y durante el siglo XX.

Es posible que el propio Henry Cavendish pudiera haber tenido dudas sobre la sabiduría de dejar que parte de la riqueza familiar acabara yendo fuera de la familia, Sin embargo, aunque difícilmente se le puede tachar de derrochador, no tenía reparos en gastar dinero cuando había una buena razón para hacerlo. Por supuesto, empleó a algunos ayudantes para que colaboraran en sus trabajos científicos, pero también se aseguró de que tuvieran unas instalaciones adecuadas en las que realizar aquellas tareas. Por lo tanto, si hubiera vivido en la década de 1870, habría comprendido lo necesaria que era una institución como el Cavendish Laboratory y habría aprobado el gasto que se hizo. Poco antes de morir su padre, Henry alquiló en Hamp-

stead una casa de campo que utilizó durante unos tres años. Después de 1784, puso en alquiler la casa de Great Marlborough Street, pero compró otra casa en la ciudad cerca de Bedford Square (una casa que aún existe) y, después de marcharse de Hampstead, compró otra casa de campo en Clapham Common, al sur del río Támesis. En todos estos lugares, su vida giraba siempre en torno a su trabajo científico y no tenía en absoluto vida social, salvo los encuentros con otros científicos.

Henry Cavendish era terriblemente tímido y rara vez salía, excepto para acudir a reuniones científicas —además, en estas reuniones, solía suceder que los que llegaban tarde le encontraban fuera, al lado de la puerta, intentando armarse de valor para entrar, y esta actitud era la habitual incluso mucho después de que hubiera llegado a ser un científico respetado de pleno derecho. Se comunicaba con sus criados escribiéndoles notas, siempre que era posible; además, hay varias anécdotas en las que se cuenta que, al encontrarse inesperadamente con una mujer a la que no conociera con anterioridad, se tapaba los ojos con la mano y, literalmente, salía corriendo. A menudo viajaba por Gran Bretaña en un carruaje durante los meses de verano, acompañado por uno de sus ayudantes, realizando investigaciones científicas (se interesaba por la geología) y visitando a otros científicos.

Como ya hemos dicho, su vida social giraba en torno a la ciencia: en 1758, Henry Cavendish asistió por primera vez a una reunión de la Royal Society, a la que acudió como invitado de su padre. Fue elegido miembro por sus propios méritos en 1760 y, aquel mismo año, entró a formar parte del Royal Society Club, una sociedad que organizaba cenas y estaba formada por miembros de la Royal Society, pero era una institución separada de ésta. Durante los cincuenta años siguientes asistió a casi todas las cenas del club, que se celebraban semanalmente durante la mayor parte del año.[12] Para hacemos una idea del

valor del dinero en aquellos días, en una ocasión, por tres chelines (actualmente 15 peniques) el menú incluyó nueve platos de carne, aves o pescado, dos tartas de fruta, pudín de pasas, mantequilla y queso, además de vino, cerveza negra o limonada.[13]

Las obras publicadas que consolidaron la reputación de Henry Cavendish como «el más sabio entre todos los ricos» fueron en realidad la punta del iceberg de sus actividades de investigación, ya que en la mayoría de los casos los resultados no se publicaron en vida este científico. La totalidad de su obra fue de amplio espectro y habría podido tener también una profunda influencia en la física (especialmente en el estudio de la electricidad) si sus resultados se hubieran dado a conocer a sus contemporáneos. Sin embargo, la obra publicada versaba principalmente sobre química, disciplina en la que no fue menos influyente, y se encuadraba de lleno en la línea principal de los avances que se produjeron durante la segunda mitad del siglo XVIII. La primera investigación química de Cavendish de la que tenemos noticias fue llevada a cabo alrededor de 1764 e incluía un estudio sobre el arsénico; sin embargo, estos resultados no se publicaron y no sabemos por qué Cavendish eligió concretamente esta sustancia para su investigación. No obstante, para ver en perspectiva cuáles fueron sus habilidades, hay que mencionar que en aquella época desarrolló un método para preparar ácido arsénico (que se utiliza todavía actualmente), al que también llegó Scheele de manera independiente en 1775 y que habitualmente se atribuye a este último (lo cual es correcto, dada la reticencia de Cavendish a publicar sus hallazgos). Pero, cuando Cavendish finalmente lo publicó en *Philosophical Transactions* en 1766, fue todo un éxito.

Los estudios químicos de Henry Cavendish: su publicación en «Philosophical Transactions»

En realidad, Henry Cavendish, que para entonces tenía ya 35 años de edad, preparó un juego de cuatro trabajos escritos conectados entre sí, en los que describía sus experimentos con diferentes gases (o «aires»). Por alguna razón que no conocemos, sólo los tres primeros trabajos se publicaron realmente, pero contenían lo que fue probablemente el más importante de sus descubrimientos: que el «aire» que se desprende cuando los metales reaccionan con ácidos es una sustancia completamente distinta, diferente de cualquier otra cosa existente en el aire que respiramos. Este gas se conoce actualmente como hidrógeno, pero Cavendish, por razones obvias, lo llamó «aire inflamable». Siguiendo la línea de Black, Cavendish realizó muchas pruebas cuantitativas minuciosas, entre otras la comparación de los tipos de explosiones que se producían cuando cantidades diferentes de aire inflamable se mezclaban con el aire ordinario y se inflamaban, o la determinación de la densidad del aire inflamable. Pensó que eran los metales que intervenían en la reacción los que liberaban este gas (actualmente sabemos que procede de los ácidos) y lo identificó con el flogisto —para Cavendish, aunque no todos sus contemporáneos pensaban igual, el hidrógeno «era» flogisto—. Cavendish investigó también las propiedades del «aire fijo» (dióxido de carbono) descubierto por Priestley, realizando siempre mediciones precisas, pero sin afirmar nunca que los resultados tuvieran una exactitud mayor que la que permitía la precisión de los instrumentos de medición utilizados. En 1767, publicó un estudio sobre la composición química del agua mineral, pero a continuación, quizá motivado por la lectura de la *History of Electricity* de Priestley, que se publicó aquel año, parece ser que dio un giro a su investigación y se centró en la electricidad, publicando en *Philosophical Transactions,* en 1771, un modelo teórico basado en la idea de que la electricidad era un fluido.

Esta publicación parece haber sido totalmente ignorada y, aunque Cavendish continuó experimentando con la electricidad, no publicó más sobre el tema. Esto supuso una gran pérdida para la ciencia de la época, pero todos los hallazgos de Cavendish (por ejemplo, lo que luego sería la «ley de Ohm») fueron reproducidos de manera independiente por generaciones posteriores de científicos (en este caso Ohm) y los comentaremos en su contexto más adelante. Sin embargo, vale la pena mencionar que en un conjunto de experimentos maravillosamente precisos, en los que se utilizaba una esfera conductora instalada concéntricamente dentro de otra esfera conductora (y cargada), Cavendish demostró que la fuerza eléctrica cumple una ley del inverso del cuadrado (lo que luego sería la «ley de Coulomb») con una precisión de hasta ± 1 por 100.

A principios de la década de 1780, Cavendish volvió a dedicarse al estudio de los gases. Como dijo en la gran informe que reflejaba los resultados de este trabajo,[14] los experimentos se hicieron «principalmente con intención de averiguar la causa de la conocida disminución de aire común que se observa en todos los procesos diversos en que dicho aire es flogistizado, y descubrir qué sucede con esa cantidad de aire que desaparece en el transcurso de dichos procesos». Dicho con la terminología moderna, la razón por la que el aire «disminuye» cuando se produce en él una combustión es que el oxígeno del aire se combina con la materia que sufre la combustión, de tal forma que hasta un 20 por 100 del aire común puede quedar incorporado a un compuesto sólido o líquido. Sin embargo, aunque Priestley ya había descubierto el oxígeno y había comprobado que constituye aproximadamente una quinta parte del aire común, en la época en que Cavendish llevó a cabo estos nuevos experimentos, el proceso de la combustión estaba lejos de ser comprendido adecuadamente, y Cavendish, como muchos

otros, pensó que en dicho proceso se «añadía» flogisto al aire, en vez de «tomarse» oxígeno del aire.

Dado que Cavendish creía que su aire inflamable «era» el flogisto, resultaba natural que utilizara el gas que ahora llamamos hidrógeno en estos experimentos. La técnica que Cavendish usó era la que había inventado el pionero de la electricidad Alessandro Volta y que luego utilizó en sus experimentos John Warltire, un amigo de Priestley, que posteriormente realizó experimentos similares. Según esta técnica, mediante una chispa eléctrica se hacía explotar una mezcla de hidrógeno y oxígeno en un recipiente sellado de cobre o de cristal. Debido a que el recipiente estaba sellado, se podía pesar todo antes y después de la explosión, ya que sólo la luz y el calor salían del recipiente, y se evitaba cualquier tipo de contaminación producida por otros materiales, cosa que hubiera sido imposible en caso de proceder al encendido mediante, por ejemplo, una vela. Puede que para los estándares modernos esta tecnología no resulte muy sofisticada, pero es otro ejemplo de cómo los avances de la ciencia dependían completamente de aquella tecnología perfeccionada.

Warltire observó que el interior del recipiente de cristal quedaba cubierto de gotas después de la explosión, pero ni él, ni Priestley, que informó sobre los logros de Warltire, se dieron cuenta de lo que significaba esto. Estaban más interesados en la posibilidad de que el calor tuviera un peso que se escapara del recipiente al calentarse éste durante la explosión.[15] Los experimentos de Warltire parecían poner de manifiesto esta pérdida de peso, pero a principios de 1781, unos experimentos mucho más cuidadosos llevados a cabo por Cavendish (que fue, dicho sea de paso, uno de los primeros partidarios de la idea de que el calor está asociado con el movimiento) demostraron que esto no era así. Es interesante ver lo que dijo sobre estos experimentos en el informe que publicó en 1784:

> En el último volumen del doctor Priestley sobre experimentos, se relata uno del señor Warltire en el que se dice que, prendiendo eléctricamente una mezcla de aire inflamable y aire común en un recipiente cerrado de cobre que contenga aproximadamente tres pintas [alrededor de 1,7 litros], se detectaba siempre una pérdida de peso, que por término medio venía a ser de 2 gramos [unos 130 mg]… También se cuenta que, repitiendo el experimento en recipientes de cristal, el interior del cristal, aunque antes estuviera limpio y seco, se cubre de pequeñas gotas inmediatamente, lo cual confirma una opinión que él había mantenido durante mucho tiempo, según la cual el aire común deposita su humedad por flogistización. Dado que este último experimento parecía poder arrojar mucha luz sobre el tema que yo tenía en estudio, pensé que valía la pena examinarlo con más detalle. También el primer experimento, si no había errores en él, resultaba sumamente extraordinario y curioso, pero yo no conseguí el resultado que él mencionaba: aunque el recipiente que utilicé contenía una cantidad mayor que el del señor Warltire, concretamente 24 000 granos de agua [algo más de 1,5 kg], y aunque repetí el experimento varias veces con distintas proporciones de aire común y aire inflamable, nunca pude percibir una pérdida de peso de más de un quinto de grano [unos 13 mg], y la mayoría de las veces no observé pérdida alguna.

En una nota a pie de página, Cavendish mencionaba que, desde que había llevado a cabo sus experimentos, Priestley había descubierto también que los intentos de reproducir los resultados de Warltire no tenían éxito. Utilizando la terminología moderna diríamos que Cavendish demostró que el peso del agua formada por la explosión era igual a la suma de los pesos de hidrógeno y oxígeno utilizados para dicha explosión. Pero no lo expresó de esta manera.

Cavendish tardó tanto tiempo en llevar a la imprenta estos resultados porque eran solamente el comienzo de una serie de meticulosos experimentos en los que investigó los resultados de hacer explotar distintas proporciones de hidrógeno con aire y analizó cuidadosamente las gotas de líquido depositadas sobre el cristal. Fue especialmente prudente con esto, porque en algunos de sus primeros experimentos el líquido resultó ser ligeramente ácido —sabemos actualmente que, si ponemos una cantidad de hidrógeno que es insuficiente para agotar todo el oxígeno contenido en el recipiente sellado, el calor de la explosión hace que el oxígeno sobrante se combine con el nitrógeno

del aire para formar óxidos de nitrógeno, que forman la base del ácido nítrico. Sin embargo, finalmente Cavendish descubrió que con una cantidad suficiente de «aire inflamable» siempre desaparecía la misma proporción de aire común y el líquido producido por la explosión era agua pura. Descubrió que «423 medidas de aire inflamable eran casi[16] suficientes para flogistizar 1000 medidas de aire común; y que la cantidad de aire que quedaba después de la explosión era entonces muy poco más de los cuatro quintos del aire empleado». En experimentos anteriores había descubierto que el 20,8 por 100 del volumen del aire común es, dicho en la terminología moderna, oxígeno. Por lo tanto, la proporción entre los volúmenes del hidrógeno y el oxígeno gaseosos que se necesitaba para convertir toda la mezcla de gases en agua era, según sus cifras, 423:208, que está dentro del 2 por 100 de error con respecto a la proporción (2:1) en que, según se sabe actualmente, estos gases se combinan.

El agua no es un elemento

Por supuesto, Cavendish describió sus resultados en términos del modelo del flogisto (incluso explicó de este modo la producción de ácido nítrico a partir del «aire flogistizado», que nosotros llamamos nitrógeno, pero su explicación es horriblemente complicada), y no pensó en el hidrógeno y el oxígeno considerándolos como elementos que se combinan físicamente para formar el agua. Pero demostró que el agua no era en sí un elemento y que, de alguna manera, estaba formada por una mezcla de otras dos sustancias. Este fue un paso clave en las últimas fases de la transformación de la alquimia en química. Desafortunadamente, debido a que Cavendish era tan cuidadoso y minucioso investigando todas y cada una de las posibilidades antes de publicar sus resultados, en la época en que final-

mente los publicó, otros estaban ya trabajando siguiendo líneas similares y, durante algún tiempo, se produjo una cierta confusión en cuanto a las prioridades en la autoría de los descubrimientos. En Inglaterra, en cierta medida sobre la base del tipo de experimentos en los que fueron pioneros Volta y Warltire, James Watt llegó al concepto de la naturaleza compuesta del agua en algún momento alrededor de 1782 y 1783, y sus especulaciones, que en ningún caso eran tan completas y precisas como la obra de Cavendish, fueron publicadas también por la Royal Society en 1784. En Francia, a Lavoisier le llegaron noticias de los primeros resultados de Cavendish cuando visitó París en 1783. Charles Blagden, un científico que también llegó a ser secretario de la Royal Society y trabajaba asociado con Cavendish.[17] Lavoisier se puso rápidamente a investigar el fenómeno y, aunque habitualmente solía ser un experimentador meticuloso, utilizó también una técnica experimental más floja que la de Cavendish y escribió el informe sobre los resultados sin dar crédito plenamente a los trabajos anteriores de Cavendish. Pero todo esto es agua pasada y nadie pone en duda actualmente el papel desempeñado por Cavendish en la identificación del agua como sustancia compuesta —un trabajo que iba a ser clave para que Lavoisier pudiera luego echar abajo el modelo del flogisto, y desarrollara una forma mejor de comprender la combustión.

Sin embargo, antes de ir a la obra propia de Lavoisier, hay otros dos logros de Cavendish que son demasiado importantes para quedar omitidos en nuestra historia, aunque no forman parte del desarrollo de la química en el siglo XVIII. El primero constituye un ejemplo de lo increíblemente preciso que era Cavendish como experimentador y de cómo se adelantó a su tiempo en muchos aspectos. En un informe publicado en 1785, Cavendish describía experimentos sobre el aire en los que se hacía un chispeo prolongado de nitrógeno (aire flogistizado) y

oxígeno (aire desflogistizado) sobre un álcali. En este proceso se agotaba todo el nitrógeno y se producía una variedad de óxidos de nitrógeno. Como un resultado secundario de este trabajo, Cavendish observó que resultaba imposible eliminar todo el gas de su muestra de aire y que, incluso después de que se hubiera extraído todo el oxígeno y el nitrógeno, quedaba una pequeña burbuja, «ciertamente no más de 1/120 de la cantidad de aire flogistizado». Cavendish atribuyó esto a un error experimental, pero de todas formas lo anotó, para dejar el informe completo. Más de un siglo después, este trabajo llamó la atención de William Ramsay, que trabajaba en el University College de Londres, y de lord Rayleigh, que trabajaba en el Cavendish Laboratory de Cambridge (hay relatos diferentes sobre cómo llegó este trabajo a llamar la atención de estos científicos). Ambos decidieron investigar la misteriosa burbuja de Cavendish y, en 1894, descubrieron un gas hasta entonces desconocido, el argón, que está presente en unas proporciones pequeñísimas (0,93 por 100 o 1/107) en la atmósfera. Este trabajo les supuso la concesión del Premio Nobel, en 1904 (en realidad dos premios Nobel, ya que Rayleigh recibió el de física y a Ramsay le fue concedido el de química). Los premios Nobel nunca se conceden a título póstumo, pero, si esto fuera posible, es seguro que Cavendish habría sido incluido en esta lista de honor por sus trabajos realizados 120 años antes.

El experimento de Cavendish: pesar la Tierra

La última contribución de Cavendish que hemos de mencionar es también el último trabajo importante que llevó a cabo, el más famoso y el tema de su última publicación importante, que se leyó ante la Royal Society el 21 de junio de 1798, cuatro meses antes de que Cavendish cumpliera sesenta y siete años. A una edad a la que la mayoría de los científicos han dejado de

hacer contribuciones importantes, Cavendish en una dependencia de su casa de Clapham Common, había pesado la Tierra.

Lo que se conoció como el «experimento de Cavendish» fue en realidad concebido por John Michell, que fue durante mucho tiempo amigo de Cavendish, y de quien hablaremos en el próximo capítulo. Michell ideó el experimento y llegó a construir el equipamiento necesario para llevarlo a cabo, pero murió en 1793, ante de poder realizar el experimento por sí mismo. Todo el equipamiento científico de Michell fue heredado por su antiguo *college*, el Queens de Cambridge, pero, dado que no había allí nadie competente para seguir trabajando en el proyecto de Michell de pesar la Tierra, Francis Wollaston, un profesor de Cambridge, se lo pasó a Cavendish (puede que influyera el hecho de que uno de los hijos de Wollaston era vecino de Cavendish en Clapham Common, pero en cualquier caso estaba claro que Cavendish era el hombre adecuado para este trabajo, a pesar de su edad). El experimento era en principio muy sencillo, pero en la práctica requería una gran habilidad debido a que las fuerzas que había que medir eran pequeñísimas. El equipamiento, que Cavendish tuvo que reconstruir en gran medida, incluía una barra de madera fuerte y ligera de 6 pies de largo [unos 183 cm] con una pequeña bola de plomo, de unas dos pulgadas de diámetro [5,08 cm], en cada extremo. La barra estaba suspendida por su punto medio mediante un cable. Dos bolas de plomo mucho más pesadas, de unos 130 kg cada una, estaban suspendidas de tal modo que era posible hacerlas girar hasta situarlas a una distancia exacta de las bolas pequeñas, y todo el aparato estaba colocado en el interior de una caja de madera para evitar que su funcionamiento se viera perturbado por corrientes de aire. Debido a la atracción gravitatoria entre los grandes pesos y las pequeñas bolas, la barra giraba ligeramente en el plano horizontal hasta que la torsión del cable la hacía detenerse. Para medir la fuerza correspondiente a

la amplitud de este giro, Cavendish llevó a cabo experimentos en ausencia de los grandes pesos y con la barra horizontal rotando hacia un lado y hacia otro como un péndulo horizontal. El aparato en su conjunto se llama balanza de torsión.

A partir de todo esto, Cavendish calculó la fuerza de atracción ejercida entre uno de los pesos de unos 130 kg y cada bola pequeña. Pero ya conocía el valor de la fuerza de atracción que ejercía la Tierra sobre la bola pequeña —el peso de ésta— por lo que pudo calcular la masa de la Tierra a partir de la proporción entre las dos fuerzas. También es posible utilizar tales experimentos para medir el valor de la fuerza gravitatoria, que es un número *G* conocido como constante gravitatoria; es para esto para lo que se siguen utilizando actualmente estos experimentos. Pero Cavendish no se planteó este objetivo y no midió el valor de *G*, aunque a partir de sus datos se puede deducir el valor de esta constante. De hecho, Cavendish no dio en sus resultados el valor de la masa de la Tierra como tal, sino que calculó el valor de su densidad. Llevó a cabo una serie de ocho experimentos en agosto y septiembre de 1797, y nueve más en abril y mayo de 1798. Los resultados, publicados en *Philosophical Transactions*,[18] daban para la densidad de la Tierra un valor que él expresó como 5,48 veces la densidad del agua. Con respecto a estos experimentos, tuvo en cuenta muchas posibles fuentes de error y utilizó dos cables diferentes, comparando luego los dos conjuntos de resultados.

Este valor era ligeramente superior a una estimación que habían deducido unos geólogos un poco antes, basándose en mediciones de la desviación que sufría un péndulo con respecto a la vertical al situarlo enfrente de una gran montaña. Pero estos estudios dependían de que se averiguara la densidad de las rocas que formaban la montaña y, en una carta dirigida a Cavendish en 1798, James Hutton, unos de los geólogos que participaron en este trabajo, dijo que había llegado a pensar que el va-

lor dado por ellos había sido subestimado y que el verdadero valor de la densidad de la Tierra a partir de este método se situaba «entre 5 y 6».[19] Muchos años más tarde, se observó que, a pesar de todo el cuidado que había puesto en su trabajo, Cavendish había tenido un pequeño despiste aritmético en sus cálculos y que el valor de la densidad de la Tierra debía ser, utilizando sus propios números, 5,45 veces la densidad del agua. El valor que se da actualmente para la densidad media de la Tierra, a partir de varias técnicas aplicadas para su cálculo, es 5,52 veces la densidad del agua, casi un 1 por 100 mayor que el valor de Cavendish después de proceder a corregirlo. La mejor analogía que conocemos para dar una idea de la precisión con que se hicieron estos experimentos está en un libro escrito por una de las personas que participó en ellos a finales del siglo XIX, el físico inglés John Poynting (1852-1914).[20] En un informe sobre los experimentos que utilizaban la balanza vertical común para medir las fuerzas diminutas producidas al colocar una gran masa bajo un platillo de la balanza, decía lo siguiente:

> Imaginemos una balanza lo suficientemente grande como para contener en un platillo toda la población de las islas Británicas, y que se ha colocado en ese platillo a toda la población excepto un muchacho de talla mediana. Entonces, el aumento de peso que se ha de medir sería equivalente a medir el aumento debido a colocar al muchacho en el platillo con el resto de las personas. La precisión de la medición sería equivalente a observar si se ha quitado o no una de sus botas antes de subir al platillo.

Cavendish había sido casi igual de preciso casi cien años antes.

Durante la primera década del siglo XIX, cuando ya pasaba de los 70 años de edad, Cavendish seguía haciendo prácticamente la misma vida que había hecho siempre, realizando experimentos científicos (aunque nada que valga la pena mencionar aquí), acudiendo a sus cenas en el Royal Society Club y asistiendo a reuniones científicas (se había suscrito muy pronto a la Royal Society, donde formó parte de la junta directiva y se tomó un

interés activo por la obra de Humphry Davy). Murió tranquilamente, en su casa, el 24 de febrero de 1810, después de una breve enfermedad, y fue enterrado en la cripta familiar en la iglesia All Saints de Derby (que es actualmente la catedral de Derby). Científicos como Black, Priestley, Scheele y Cavendish realizaron los descubrimientos que establecieron las bases de la química como ciencia. Cavendish vivió para ver estos descubrimientos reunidos en una síntesis que hizo que la química fuera realmente una disciplina científica. El artífice de esta síntesis fue Antoine Lavoisier, el hombre que está considerado como el químico más grande de su tiempo. De hecho, Cavendish sobrevivió a Lavoisier, quien, como ya veremos, murió víctima del Terror durante la Revolución Francesa.

Antoine-Laurent Lavoisier: estudio del aire; estudio del sistema respiratorio

Antoine-Laurent Lavoisier nació en el seno de una familia católica en París el 26 de agosto de 1743, en el distrito conocido como el Marais. Tanto su abuelo (llamado también Antoine), como su padre (Jean-Antoine), fueron abogados ilustres y el joven Antoine se educó con las comodidades de un ambiente de clase media. Tenía una hermana nacida en 1745, a la que bautizaron como Marie-Marguerite-Emilie, pero su madre, Emilie, murió en 1748 y la familia fue a vivir con su abuela materna, que era viuda, cerca de lo que es ahora Les Halles. Allí, la hermana soltera de Emilie, que se llamaba Marie, se convirtió en una madre suplente y se dedicó por completo a los niños. Antoine asistió al Collége Mazarin (fundado por deseo del cardenal Mazarino, que vivió entre 1602 y 1661, y gobernó Francia durante la minoría de edad de Luis XIV), donde fue un alumno brillante en lenguas clásicas y literatura, y también empezó a aprender nociones científicas. En 1760, la hermana de Lavoi-

sier, Marie, murió a los 15 años de edad; un año más tarde Lavoisier ingresó en la Escuela de Leyes de la Universidad de París, con intención de hacer la carrera que era tradicional en la familia, y obtuvo el título de graduado en leyes en 1763, consiguiendo posteriormente la licenciatura en 1764. Sin embargo, sus estudios de derecho le dejaron tiempo libre para desarrollar su interés por la ciencia, y asistió a cursos de astronomía y matemáticas, botánica, geología y química, en los que participó al mismo tiempo que hacía sus estudios oficiales. Después de terminar su formación, lo que le atrajo fue la ciencia y no las leyes, por lo que pasó tres años trabajando como ayudante de Jean-Étienne Guettard (1715-1786) en el proyecto de realizar un mapa geológico de Francia, para lo cual tuvo que investigar y recoger especímenes.

Cuando hubo terminado este trabajo de campo, Lavoisier tuvo libertad para elegir cualquier profesión que le agradara. Su abuela había fallecido en 1766 y le había dejado la mayor parte de su fortuna, que era lo suficientemente cuantiosa como para vivir de ella. Aquel mismo año, se convirtió en un personaje ampliamente conocido en los círculos científicos cuando le concedieron una medalla de oro que le fue entregada por el presidente de la Academia Real de las Ciencias en representación del rey, por un ensayo que trataba sobre el mejor modo de iluminar las calles de una gran ciudad por la noche. En 1767, cuando el levantamiento del mapa geológico de Guettard había obtenido ya una subvención oficial del gobierno, Lavoisier partió con Guettard (no como ayudante, sino como colaborador en pie de igualdad) a hacer el estudio de Alsacia y Lorena. Este trabajo le granjeó una fama tan efectiva que, en 1678, fue elegido miembro de la Real Academia de las Ciencias, a la temprana edad de 25 años.

El modo de funcionar de la Academia Francesa era bastante diferente del de la Royal Society inglesa. La Royal Society era,

en sentido estricto, meramente un club de caballeros, sin estatus oficial. Pero la Academia fue fundada por el gobierno francés y a sus miembros se les pagaba un salario y se esperaba de ellos que realizaran trabajos de carácter científico para el gobierno, incluso en el caso de que ocuparan al mismo tiempo otros cargos. Lavoisier, que era un administrador muy capaz, tomó parte plenamente en las actividades de la academia y, durante el tiempo en que fue miembro de ella, trabajó en muchos informes sobre temas tan diversos como la adulteración de la sidra, el globo de Montgolfier, los meteoritos, el cultivo de coles, la mineralogía de los Pirineos y la naturaleza del gas que emana de los pozos negros. Sin embargo, las indudables facultades de Lavoisier no incluían la precognición, y en 1768 tomó lo que resultaría ser la decisión más equivocada de toda su vida, cuando compró una participación de un tercio de una *Ferme* [cesión gubernamental para la acción recaudatoria de impuestos].

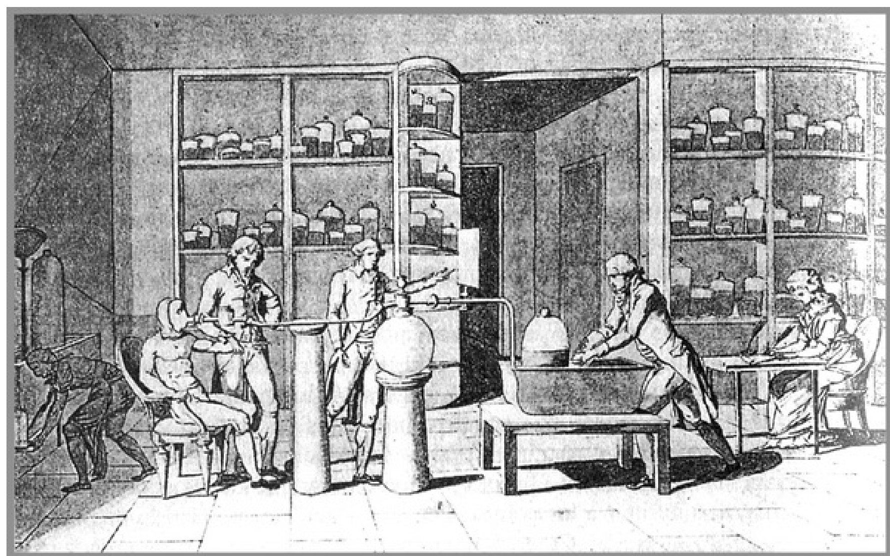
El sistema fiscal francés era en aquella época sumamente injusto, incompetente y corrupto. Muchos de sus problemas se derivaban de la estabilidad que había tenido el sistema político francés en los siglos XVII y durante los 72 años del reinado de Luis XIV, que contó inicialmente con la ayuda del cardenal Mazarino y cubrió el período en que Inglaterra expulsó del trono dos veces a sus monarcas y éstos se resistieron a tal expulsión. Después, Luis XV reinó durante otros 59 años, desde 1715 a 1774. Ninguno de ellos tuvo en cuenta la voluntad del pueblo. El resultado fue que ciertas prácticas que podían haber sido aceptables como «el orden natural de las cosas» a principios del siglo XVII (como la exención fiscal para los nobles), estaba todavía en vigor durante el último cuarto del siglo XVIII, como reliquias fosilizadas de una época pasada. Este fue un factor importante para generar el descontento que condujo a la Revolución Francesa.

En la época en que Lavoisier se hizo recaudador de impuestos, el derecho a recaudar impuestos (tales como los impuestos sobre la sal y los derechos arancelarios sobre las bebidas alcohólicas) se concedía a grupos de financieros conocidos como *fermiers* [titulares de una cesión gubernamental para la acción recaudatoria de impuestos], que pagaban al gobierno por este privilegio, generalmente utilizando capital prestado. Los *fermiers généraux* del rey, que es como se les llamaba, recuperaban luego su inversión más un beneficio razonable con lo que recaudaban en concepto de impuestos y, si conseguían recaudar más de lo que habían pagado al rey, podían quedarse con ello.[21] Para poner las cosas todavía peor, incluso los *fermiers* honestos y eficientes, que había algunos, sólo podían obtener los derechos de recaudar impuestos proporcionando a cambio sinecuras a los ministros, a las familias de éstos o a los miembros de la familia real, que así sacaban unos ingresos, conocidos como pensiones, a partir de los beneficios de la *ferme*, sin realizar para ello trabajo alguno. No hace falta mucha imaginación para hacerse una idea de lo impopular que era este sistema entre todas las personas que pagaban impuestos (es decir, todos menos los ricos); sin embargo, desde nuestra perspectiva de principios del siglo XXI, hay que echarle mucha más imaginación a la cosa para considerar que Lavoisier no era un mal hombre dispuesto a oprimir a los pobres, sino que sencillamente hizo lo que él consideraba una sólida inversión. Ciertamente trabajó duro para su *ferme* y no hay indicios de que fuera especialmente severo como recaudador de impuestos. Pero, de hecho, era un recaudador de impuestos y el sistema en sí mismo sí era severo, incluso cuando se gestionaba dentro de la ley. Pero, aunque este negocio terminaría en desgracia, ciertamente los inicios fueron buenos, y no sólo desde un punto de vista económico. El 16 de diciembre de 1771, Lavoisier contrajo un matrimonio de conveniencias con Marie-Anne-Pierrette Paulze, que tenía 13 años

y era hija de un colega *fermier*, el abogado Jacques Paulze. Para resaltar el acontecimiento, el padre de Lavoisier le compró un título de la baja nobleza; aunque rara vez lo usó, desde entonces se convirtió oficialmente en un «De Lavoisier». Aunque no tuvieron hijos, parece ser que el matrimonio fue feliz y Marie se interesó apasionadamente por la ciencia, trabajando como ayudante de Lavoisier y colaborando con él en la tarea de tomar nota por escrito de sus experimentos.

A finales de la década de 1760, Lavoisier había realizado ya un conjunto de experimentos que partían del meticuloso planteamiento de Black con respecto a la química, con el que finalmente se demostró que el agua no podía transformarse en tierra. Pero el trabajo por el cual Lavoisier es actualmente famoso comenzó en la década de 1770, después de su casamiento. Calentando diamantes mediante la luz solar concentrada a través de una enorme lente (cuatro pies [unos 122 cm] de diámetro y seis pulgadas [alrededor de 15 cm] de espesor) demostró en 1772 que el diamante es combustible, y hacia finales de aquel año había demostrado que el azufre con la combustión aumenta su peso, en vez de reducirlo. Fue su primer paso independiente hacia la idea moderna de combustión como un proceso en el que el oxígeno del aire se combina con la sustancia que sufre la combustión. Este fue el preludio de una larguísima serie de experimentos, entre los cuales figuraba un meticuloso estudio del «aire fijo» de Black y la producción de lo que actualmente conocemos como oxígeno a partir del calentamiento del óxido rojo de plomo utilizando la gran lente antes mencionada. En 1774, cuando todavía no hacía mucho que había descubierto el oxígeno, Priestley emprendió un viaje al continente con lord Shelburne y, en octubre de aquel mismo año, visitó a Lavoisier en París, donde le notificó sus anteriores resultados. A partir de noviembre de 1774. Lavoisier llevó a cabo sus propios experimentos siguiendo las líneas de investigación de

Priestley y, en mayo de 1775, publicó un informe en el que afirmaba que el «principio» que se combinaba con los metales durante el proceso de calcinación (formando un óxido) procedía de la atmósfera y era el «aire puro» descubierto por Priestley.



23. Experimento de Lavoisier sobre la respiración humana, según un dibujo de Marie-Anne Lavoisier.

Fue por aquella época cuando Lavoisier comenzó a implicarse más en trabajos gubernamentales. Cuando Luis XVI accedió al trono en 1774, intento reformar algunas de las prácticas administrativas corruptas que había heredado. Entre éstas estaba el modo en que se suministraba pólvora al ejército y a la armada. Al igual que el sistema fiscal, este suministro estaba privatizado y era corrupto e ineficaz. En 1775, Luis XVI nacionalizó la industria de la pólvora, nombrando cuatro comisionados (uno de ellos Lavoisier) para gestionarla. Lavoisier se trasladó al arsenal de París para poder realizar más fácilmente este trabajo, que, como todo cuanto hacía, llevó a cabo con diligencia y eficacia, e instaló un laboratorio en el arsenal. Fue allí donde estableció la superioridad del modelo moderno de combustión con

respecto al modelo del flogisto y finalmente, en 1779, dio al oxígeno este nombre.[22]

Como otros químicos de su tiempo, Lavoisier estaba profundamente interesado por la naturaleza del calor, al que llamó «materia del fuego». Después de llevar a cabo varios experimentos que demostraban que los animales (incluido el ser humano) durante la respiración convertían en «aire fijo» el oxígeno procedente del aire, llegó a la conclusión de que los animales mantienen su temperatura corporal mediante la conversión del oxígeno en «aire fijo», del mismo modo que el carbón desprende calor cuando se quema (en principio, tenía razón, aunque, por supuesto, los procesos que generan el calor corporal son un poco más complicados que una simple combustión). Pero ¿cómo pudo Lavoisier comprobar esta hipótesis? Con el fin de probarla, a principios de la década de 1780 llevó a cabo algunos experimentos ingeniosos con un cobaya, realizándolos en colaboración con su colega de la Academia Pierre Laplace, cuya historia contaremos en el próximo capítulo.

Colocaron el cobaya en un recipiente rodeado de hielo, todo ello dentro de otro recipiente de mayor tamaño (el conjunto se denomina calorímetro de hielo) y, después de 10 horas en aquel ambiente frío, el calor que desprendía el cuerpo del animal había fundido unos 359 gramos de hielo. Quemando pequeños trozos de carbón vegetal en un calorímetro de hielo, Lavoisier y Laplace averiguaron cuánto carbón había que quemar para fundir aquella cantidad de hielo. Luego, en una serie de experimentos hechos separadamente, midieron cuánto aire fijo producía con su respiración el cobaya durante 10 horas en reposo y cuánto aire fijo se producía quemando distintas cantidades de carbón. Llegaron a la conclusión de que la cantidad de aire fijo que producía con su respiración el cobaya habría sido la misma que la que producía la combustión del carbón vegetal que se quemaba cuando se producía el calor suficiente para fundir 298

gramos de hielo. La coincidencia no era exacta, pero Lavoisier y Laplace eran plenamente conscientes de el experimento era imperfecto y lo consideraron como una confirmación de que los animales se mantenían calientes convirtiendo lo que actualmente llamaríamos carbono (procedente de los alimentos) en lo que llamaríamos ahora dióxido de carbono (que expulsan al respirar), combinando el carbono con oxígeno procedente del aire (que inhalan en la respiración). Lavoisier y Laplace afirmaron que la respiración «es por lo tanto una combustión, evidentemente muy lenta, pero por lo demás exactamente igual que la del carbón vegetal». Este descubrimiento fue un paso clave para situar a los seres humanos en su contexto como sistemas (aunque sean sistemas complicados) que obedecen las mismas leyes que las piedras que caen o la velas que arden. A finales del siglo XVIII, la ciencia había demostrado que no había necesidad de invocar nada ajeno al mundo conocido de la ciencia para explicar la producción del calor asociado a la vida que genera el cuerpo humano —no se necesitaba el «calor natural» de Harvey.

Coincidiendo en parte con su trabajo sobre la respiración, Lavoisier desarrolló aún más la teoría de la combustión y, en 1786, publicó lo que fue la demolición definitiva del modelo del flogisto en las *Mémoires* de la Academia de la Ciencia, aunque todavía pasó un cierto tiempo hasta que se extinguieron los últimos partidarios del modelo del flogisto. Vale la pena ofrecer aquí el resumen que hizo Lavoisier de su informe en sus propias palabras, recordando que utilizaba la palabra aire para referirse a lo que nosotros llamaríamos «gas»:

> 1. Se produce una auténtica combustión, una emisión de llama y luz, sólo en la medida en que el cuerpo combustible esté rodeado por y en contacto con oxígeno; la combustión no puede producirse en ningún otro tipo de aire, ni en el vacío, y los cuerpos que están experimentando una combustión sumergidos en otro aire o en el vacío se apagan como si hubieran sido sumergidos en agua.

2. En toda combustión existe una absorción del aire en el que tiene lugar dicha combustión; si este aire es oxígeno puro, puede ser absorbido completamente, si se toma las debidas precauciones.
3. En toda combustión hay un aumento de peso en el cuerpo que se está quemando, y este aumento es exactamente igual al peso del aire que se ha absorbido.
4. En toda combustión se desprende calor y luz.

Ya hemos mencionado cómo Charles Blagden dio a Lavoisier información sobre el trabajo de Henry Cavendish sobre la composición del agua; ahora podemos ver la naturalidad con que esto encajaba en el modelo de combustión de Lavoisier, aunque sus experimentos iniciales con la combustión del hidrógeno fueron menos precisos que los de Cavendish. No dice nada a favor de Lavoisier el hecho de que no reconociera el mérito debido a Cavendish cuando publicó por primera vez sus propios resultados, pero lo importante es que Lavoisier, y no Cavendish, fue la primera persona que observó que el agua es una sustancia compuesta formada por una combinación de «aire inflamable» y oxígeno del mismo modo que el «aire fijo» está formado por una combinación de carbono y oxígeno.

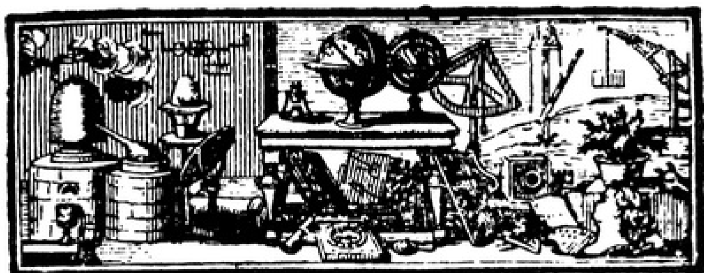
La primera tabla de los elementos; Lavoisier da nuevas denominaciones a los elementos; publica «Traite Elementaire de Chimie»

Lavoisier resumió todos los trabajos de química que hizo durante su vida en un libro titulado *Traité Elémentaire de Chimie (Tratado elemental de química)*, publicado en 1789, el año de la toma de la Bastilla. Hubo muchas traducciones y reediciones de este libro, que fijaba los fundamentos de la química como una disciplina genuinamente científica y que los químicos suelen considerar como el equivalente en química de lo que fueron los *Principia* de Newton para la física. Al mismo tiempo que proporcionaba amplias descripciones de las técnicas utilizadas en

la química, incluido el tipo de equipamiento utilizado y el tipo de experimentos realizados, Lavoisier aportó la definición más clara de lo que es un elemento químico, poniendo por fin en práctica la idea que había tenido Robert Boyle durante la década de 1660, relegando definitivamente los cuatro «elementos» de los antiguos griegos al cubo de la basura de la historia, y ofreciendo la primera tabla de los elementos que, aunque muy incompleta, se puede considerar como la base a partir de la cual ha surgido la moderna tabla de los elementos.[23] También formuló claramente la ley de la conservación de la masa, desterró algunas denominaciones antiguas (tales como aire flogistizado, aire inflamable y aceite de vitriolo) y las sustituyó por nombres basados en un sistema de nomenclatura lógico (como oxígeno, hidrógeno y ácido sulfúrico), introduciendo un modo lógico de nombrar a los componentes, como, por ejemplo, a los nitratos. Al dar a la química un lenguaje lógico, facilitó enormemente la tarea de los químicos a la hora de comunicarse los descubrimientos unos a otros.

Verdaderamente, la obra maestra de Lavoisier, aunque es uno de los más importantes libros científicos que se han publicado jamás, no entra del todo en la misma categoría que la obra maestra de Newton. Sin embargo, su publicación, en la medida en que es posible establecer hitos, marca el momento en que la química se libró de los últimos vestigios de la alquimia y se convirtió en algo reconocible como una forma ancestral de la disciplina científica que conocemos hoy en día con tal nombre. Lavoisier tenía 46 años cuando se publicó su gran libro y es bastante posible que no hubiera hecho ya ninguna otra contribución importante a la ciencia después de ésta, aunque hubiera tenido la suerte de vivir tiempos menos turbulentos. Pero, hacia el principio de la década de 1790, los acontecimientos políticos que se produjeron en Francia fueron responsables de que

Lavoisier tuviera cada vez menos tiempo para dedicarse a la ciencia.



TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE.

PREMIERE PARTIE.

De la formation des fluides aériformes & de leur décompoſition ; de la combuſtion des corps ſimples & de la formation des acides.

CHAPITRE PREMIER.

Des combinaiſons du calorique & de la formation des fluides élaſtiques aériformes.

C'EST un phénomène conſtant dans la nature, & dont la généralité a été bien établie par Boerhaave, que lorſqu'on échauffe un corps

Tome I. A

24. Portada del *Traité Élémentaire de Chimie* de Lavoisier, 1789.

Lavoisier estaba implicado activamente en el gobierno, inicialmente como resultado de haber comprado una propiedad (que incluía un castillo y una granja, que él utilizó para experimentar con la agricultura aplicando métodos científicos) en Fréchines, en la provincia de Orleáns. Aunque técnicamente era un miembro modesto de la nobleza, por si fuera poco en 1787 fue elegido miembro de la Asamblea Provincial de Orleáns como representante del tercer estado (los otros dos eran el clero y la nobleza). Políticamente era lo que actualmente llamaríamos un liberal y un reformador, que intentó inútilmente crear un sistema fiscal más justo para aquella provincia. En mayo de 1789, Lavoisier escribió a sus colegas de la Asamblea Provincial: «la desigualdad en los gravámenes no puede ser tolerada, salvo que sea a expensas de los ricos».

La primera fase del desarrollo de la Revolución Francesa, con una mayoría democrática que parecía controlar la Asamblea Nacional y con el rey marginado, encajaba muy bien con las ideas de Lavoisier. Pero las cosas pronto empezaron a ponerse feas. Aunque Lavoisier continuó prestando servicios al gobierno en la Comisión de la Pólvora y en otras actividades, cayó bajo sospecha acusado injustificadamente de que la comisión había estado llenándose los bolsillos a expensas del dinero público —de hecho, en gran medida gracias a las reformas llevadas a cabo por la comisión, Francia dispuso de suficiente pólvora de buena calidad para emprender las guerras napoleónicas. Pero lo que era más serio y podía estar más justificado es que estaba también marcado por el odio generalizado hacia los *fermiers*. A pesar de todas estas dificultades, Lavoisier siguió trabajando diligentemente por cuenta del gobierno, a pesar de que la naturaleza de éste estaba cambiando; desempeñó un pa-

pel importante en la planificación de la reforma del sistema educativo francés y, en 1790, fue nombrado miembro de la comisión que (finalmente) iba a implantar el sistema métrico. Pero nada de esto le favoreció cuando ciertos elementos de la administración jacobina decidió dar un castigo ejemplar a los antiguos *fermiers*. Lavoisier era uno de los 28 *fermiers*, unos honestos y otros corruptos, que fueron guillotinados el 8 de mayo de 1794. Aquel día él era el cuarto en la lista que se había confeccionado para las ejecuciones, y su suegro, Jacques Paulze, era el tercero. En la época en que estas ejecuciones se llevaron a cabo, Joseph Priestley navegaba por el mar en camino hacia el exilio en América. Así terminó una época brillante de la química.

Capítulo 8

LA CIENCIA ILUSTRADA II: AVANCES EN TODOS LOS FRENTES

Muchos textos sobre historia de la ciencia describen el siglo XVIII como un período en el que, aparte del espectacular progreso de la química que ya hemos relatado, no sucedió mucho más. Este siglo está considerado como un interregno, en cierto modo a la sombra de Newton, un período en el que se hacía tiempo hasta que llegaran los importantes adelantos del siglo XIX. Esta interpretación no es realmente muy acertada. Es cierto que el progreso de las ciencias físicas en el siglo XVIII avanzó en un amplio frente —desde luego, no con un único avance grandioso al nivel de los logros de Newton, sino con una enorme cantidad de avances menores que se produjeron cuando las lecciones fundamentales de la obra de Newton (que el mundo se puede abarcar y explicar mediante unas leyes físicas sencillas) se asimilaron y se aplicaron. De hecho, esta lección se asimiló de una forma tan generalizada que a partir de ahora, con unas pocas excepciones notables,[1] ya no nos será posible entrar en tantos detalles biográficos relativos a los científicos en sí mismos. Esto no se debe a que los científicos se conviertan en personas intrínsecamente menos interesantes al llegar a tiempos más recientes, sino sencillamente porque son muchos y hay mucho más que explicar. Fue después de la muerte de Newton cuando, primero en las ciencias físicas y luego en otras disciplinas, el propio relato de las cuestiones

científicas, más que el de las vidas de los individuos que contribuyen al relato, se convierte en el tema central de la historia de la ciencia y se hace cada vez más difícil conocer al protagonista de la película.

Fue durante la década que siguió a la muerte de Newton cuando se comenzó a utilizar el término *física,* en vez de *historia natural,* para denominar este tipo de investigación del mundo. Hablando en sentido estricto, se trató de una resurrección de la vieja terminología, ya que Aristóteles había empleado esta palabra, y probablemente se había utilizado también antes de Aristóteles; pero su recuperación marcó el comienzo de lo que actualmente llamamos física. Uno de los primeros libros que utilizaba la palabra en el sentido moderno, *Essai de Physique,* escrito por Pieter van Musschenbroek (1692-1761), se publicó en 1737. Durante la misma década, los físicos comenzaron a abordar el misterioso fenómeno de la electricidad. El propio Musschenbroek, que trabajaba en Leiden, inventó posteriormente (a mediados de la década de 1740) un aparato que podía almacenar grandes cantidades de electricidad. Era sencillamente un recipiente de cristal (una botella) recubierto de metal en el interior y en el exterior —un diseño primitivo de lo que actualmente llamamos condensador—. Esta botella de Leiden, como se llamó finalmente a estos aparatos, podía cargarse y almacenar electricidad para usarla en posteriores experimentos y, cuando se unía con cables varias botellas juntas, podían producir una gran descarga, suficiente para matar a un animal.



25. Demostración del modo en que la electricidad pasa a través de las personas y de los cadáveres. *Experiments and Observations,* de Watson. 1748.

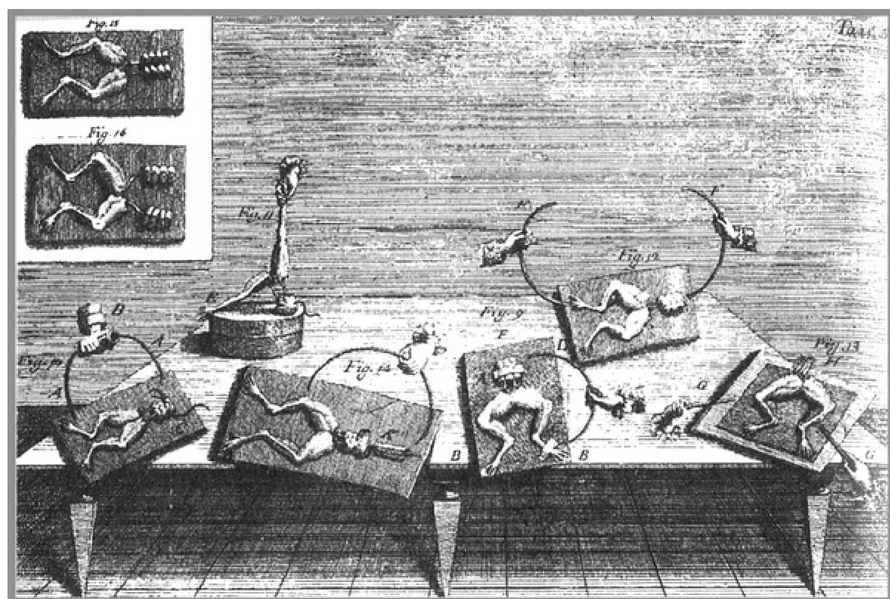
EL ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD: STEPHEN GRAY, CHARLES DU FAY, BENJAMÍN FRANKLIN Y CHARLES COULOMB

Los primeros pasos encaminados a comprender el fenómeno de la electricidad estática se llevaron a cabo mediante las botellas de Leiden. Stephen Gray, un científico experimentador inglés, nacido en torno a 1670 y fallecido en 1736, publicó una serie de informes en *Philosophical Transactions*, en los que describía cómo un corcho colocado en el extremo de un tubo de cristal adquiría características eléctricas (o, tal como diríamos ahora, se cargaba de electricidad) cuando se frotaba el cristal,[2] cómo una vara de pino insertada en el corcho transportaba la influencia eléctrica hasta el otro extremo de la vara, y cómo dicha influencia podía extenderse a distancias considerables a través de finos hilos. Gray y sus contemporáneos fabricaban electricidad, siempre que la necesitaban, mediante la fricción,

utilizando unos sencillos aparatos en los que se hacía rotar un globo de azufre mientras era friccionado (posteriormente, las esferas o los cilindros de cristal fueron sustituidos por azufre). En parte debido a la influencia de la obra de Gray, el francés Charles Du Fay (1698-1739) descubrió a mediados de la década de 1730 que hay dos tipos de electricidad (lo que actualmente llamaríamos carga positiva y carga negativa) y que las cargas de tipo similar se repelen mutuamente, mientras que las opuestas se atraen. Los trabajos de Gray y Du Fay demostraron también la importancia de aislar los materiales para evitar que la electricidad escape de los objetos cargados y probaron que cualquier cosa se podía cargar con electricidad siempre que estuviera aislada —Du Fay llegó incluso a electrificar a un hombre suspendido de unas cuerdas aislantes de seda y consiguió hacer que salieran chispas del cuerpo de aquel hombre—. Como resultado de su trabajo, Du Fay ideó un modelo para la electricidad, en el cual ésta se describía en términos de dos fluidos diferentes.

Este modelo fue refutado por el modelo que desarrolló Benjamín Franklin (1706-1790), cuyo interés por la electricidad fue más allá del famoso experimento aventurado y de tanteo (que se realizó, dicho sea de paso, en 1752 para cargar una botella de Leiden y así demostrar la relación existente entre el rayo y la electricidad). A pesar de que tenía muchos otros intereses y actividades, Franklin sacó tiempo, desde mediados de la década de 1740 hasta principios de la de 1750, para llevar a cabo importantes experimentos (utilizando las botellas de Leiden, que acababan de ser inventadas) que le llevaron al modelo de electricidad basado en un solo fluido y en la idea de que se produce una transferencia física de dicho fluido único cuando un objeto adquiere una carga eléctrica, dejando una superficie con carga «negativa» y otra con carga «positiva» (unos términos que él mismo inventó). Esto le hizo llegar de forma natural a la idea de que la carga se conserva —siempre hay la misma cantidad de

electricidad, pero puede desplazarse de un lugar a otro y, globalmente, la cantidad de carga negativa debe equilibrar la de carga positiva—. Franklin también demostró que la electricidad puede magnetizar y desmagnetizar agujas de hierro, haciéndose eco de los trabajos llevados a cabo con anterioridad por John Michell (1724-1793), el amigo de Henry Cavendish que ideó el «experimento de Cavendish». En 1750, Michell también había descubierto que la fuerza de repulsión entre dos polos magnéticos del mismo signo obedece a una ley del inverso del cuadrado, pero, aunque publicó todos estos resultados de aquel año en a *Treatise on Artificial Magnets (Tratado sobre imanes artificiales)*, nadie prestó demasiada atención a este libro, del mismo modo que nadie prestó mucha atención a las diversas aportaciones de Franklin, Priestley y Cavendish a la constatación de que la fuerza eléctrica cumple una ley del inverso del cuadrado. Hubo que esperar hasta 1780, cuando Charles Coulomb (1736-1806), partiendo de los trabajos de Priestley, llevara a cabo los experimentos definitivos sobre las fuerzas eléctricas y magnéticas, utilizando una balanza de torsión, para que finalmente todo el mundo se convenciera de que ambas fuerzas obedecen a una ley del inverso del cuadrado. Por consiguiente, esta fórmula ha pasado a la historia como ley de Coulomb.



26. Experimentos de Luigi Galvani con electricidad y patas de rana. De *Viribies Electricitatis in Motu Mascalari,* 1791.

Una vez más, estos ejemplos ilustran la interacción que existía entre la ciencia y la tecnología. El estudio de la electricidad no empezó a coger velocidad hasta que se pudo disponer de aparatos que podían fabricar electricidad. La propia ley del inverso del cuadrado pudo desarrollarse gracias a la ayuda tecnológica que supuso la balanza de torsión. Pero, el adelanto tecnológico más importante del estudio de la electricidad en el siglo XVIII llegó justo al final de este siglo, preparando el camino para los trabajos de Michael Faraday y James Clerk Maxwell en el siglo XIX. Este gran adelanto fue la invención de la batería eléctrica, que fue consecuencia de un descubrimiento científico accidental.

Luigi Galvani, Alessandro Volta y la invención de la batería eléctrica

El autor del descubrimiento fue Luigi Galvani (1737-1798), profesor de anatomía y catedrático de obstetricia de la Universidad de Bolonia. Galvani realizó una serie de experimentos sobre la electricidad animal, los cuales aparecen descritos en un informe suyo publicado en 1791. En este informe, Galvani relata cómo se había interesado en un principio por el tema después de observar unas contracciones en los músculos de una rana colocada para su disección sobre una mesa en la que había también un aparato eléctrico. Galvani demostró que las contracciones se podían inducir conectando los músculos de la rana muerta directamente al aparato o colocando la rana sobre una superficie metálica durante una tormenta. Pero su observación decisiva se produjo cuando se dio cuenta de que las patas de la rana, que estaban colgadas para secarse, se contraían cuando el gancho de latón del que estaban suspendidas entraba en contacto con un vallado metálico. Tras repetir este experimento en el interior de un edificio, sin que hubiera cerca ninguna fuente externa de electricidad, llegó a la conclusión de que la causa de las convulsiones era la electricidad almacenada o producida en los músculos de la rana.

No todo el mundo estuvo de acuerdo con él. En particular, Alessandro Volta (1745-1827), catedrático de física experimental de la Universidad de Pavía, en Lombardía, argumentó en unos informes publicados en 1792 y 1793 que la electricidad era el estímulo causante de las contracciones musculares, pero que procedía de una fuente exterior —en este caso, de una interacción entre los dos metales (latón y hierro) que entraban en contacto—. Lo difícil era demostrarlo. Pero Volta era un experimentador de primera categoría que ya había realizado trabajos importantes sobre electricidad (entre otros, el diseño de una máquina de fricción mejor preparada para producir electricidad estática y un aparato para medir la carga eléctrica) y también había trabajado sobre gases, concretamente en la medición

de la cantidad de oxígeno que hay en el aire, haciéndolo explotar con hidrógeno. Tenía capacidad sobrada para enfrentarse a este nuevo desafío.

Al principio, Volta comprobó sus teorías colocando diferentes pares de metales en contacto y tocándolos con su lengua, que demostró ser sensible a corrientes eléctricas extremadamente débiles que no podían detectarse con ninguno de los instrumentos de que se disponía en aquella época. Mientras realizaba estos experimentos e intentaba encontrar un modo de magnificar el efecto que podía sentir con su lengua transformándolo en algo más evidente, su trabajo se vio obstaculizado por los desórdenes políticos que afectaron a Lombardía como resultado de la Revolución Francesa y del subsiguiente conflicto entre Francia e Italia por el control de la región. Sin embargo, en 1799, Volta ya había dado con el aparato que haría lo que él pretendía. Se lo describió en una carta a Joseph Banks, que entonces era presidente de la Royal Society, y esta carta se leyó en una reunión de dicha sociedad en 1800.

Este invento crucial era literalmente una pila hecha con discos de plata y discos de zinc, colocados de forma alterna, y separados por discos de cartón empapados en salmuera. Esta pila se conoce como pila voltaica y fue la precursora de las pilas modernas; producía un flujo de corriente eléctrica cuando el extremo superior y el inferior de la pila se unían mediante un cable. Con esta pila se pudo lograr, por primera vez, un flujo más o menos constante de corriente eléctrica, a diferencia de la botella de Leiden, que era un artilugio de todo o nada, ya que descargaba de una vez toda la electricidad que tenía almacenada. Antes del invento de Volta, el estudio de la electricidad estaba limitado esencialmente a la investigación sobre electricidad estática; después de 1800, los físicos pudieron trabajar con corrientes eléctricas que podían establecer y cortar a voluntad. También podían reforzar la corriente añadiendo más discos a la

pila, o reducirla retirando discos. Casi inmediatamente, otros investigadores descubrieron que la corriente eléctrica procedente de una de estas pilas se podía utilizar para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, lo cual daba un indicio de que aquel invento podía ser para la ciencia un instrumento realmente poderoso. Aunque tendremos que esperar hasta el capítulo 11 para conocer estas implicaciones, la importancia del trabajo de Volta resultó obvia inmediatamente y, después de que los franceses hubieron logrado el control de Lombardía en 1800, Napoleón concedió a Volta el título de conde.

27. Carta de Volta a la Royal Society, 1800.

A pesar de que transcurrió bastante tiempo hasta que los físicos se enfrentaron abiertamente con el tema de la electricidad, muchas de las teorías del siglo XVIII resultan sorprendentemente modernas, aunque no siempre se desarrollaran del todo, ni fueran apreciadas de forma generalizada en aquella época. Por ejemplo, en una fecha tan temprana como 1738, el matemático, holandés de nacimiento, Daniel Bernoulli (1700-1782) publicó un libro de hidrodinámica en el que se describía el comportamiento de los líquidos y los gases en términos de impactos de los átomos contra las paredes de los recipientes que los contuvieran —algo muy similar a la teoría cinética de los gases, desarrollada de forma más completa en el siglo XIX, y, por supuesto, una teoría que era en gran medida una consecuencia de las ideas de Newton relativas a las leyes del movimiento—. Estas teorías también se estaban difundiendo geográficamente. En 1743, justo cinco años después de que Bernoulli publicara su gran libro, encontramos a Benjamín Franklin entre los cerebros destacados que fundaron la American Philosophical Society en Filadelfia —la primera sociedad científica en lo que son ahora los Estados Unidos de América, y la pequeña semilla de lo que llegaría a ser un gran auge de la ciencia en la segunda mitad del siglo XX.

Pierre-Louis de Maupertuis: el principio de la mínima acción

Uno de las ideas más importantes de toda la historia de la ciencia, cuyo valor no llegó a ser realmente visible hasta que llegó el auge de la ciencia en el siglo XX, fue el principio formulado por Louis de Maupertuis (1698-1759) justo un año más tarde, en 1744. De Maupertuis había sido soldado antes de dedicarse a la ciencia; su gran idea se conoce como principio de la mínima acción. «Acción» es el nombre que dan los físicos a to-

da propiedad de un cuerpo que sea medible en términos del cambio de posición de un objeto y de su momento (es decir, relaciona la masa, la velocidad y la distancia recorrida por una partícula). El principio de la mínima acción dice que la naturaleza siempre opera de tal forma que esta cantidad se mantenga en un mínimo (dicho de otra manera, la naturaleza es perezosa). Esta idea resultó de enorme importancia en la mecánica cuántica, pero el ejemplo más sencillo del principio de la mínima acción es el hecho de que la luz siempre viaja en línea recta.

Leonhard Euler: descripción matemática de la refracción de la luz

A propósito de la luz, en 1746 Leonhard Euler (1707-1783), un suizo que está considerado como el matemático más prolífico de todos los tiempos y que introdujo el uso de la letra *e* y la letra *i* en su moderno contexto matemático, explicó matemáticamente la refracción de la luz, siguiendo la idea de Huygens y asumiendo que la luz es una onda tal que cada color corresponde a una longitud de onda distinta. Pero este modelo antinewtoniano no tenía en cuenta el tiempo.[3] La teoría ondulatoria de la luz languideció precisamente por el respeto reverencial que inspiraban las teorías de Newton; otras teorías languidecieron porque fueron formuladas por científicos desconocidos en zonas remotas del mundo. Un ejemplo clásico es el de Mikhail Vasilievich Lomonosov (1711-1765), un erudito polifacético ruso que desarrolló los conceptos newtonianos relativos al átomo, formuló una teoría cinética similar a la de Bernoulli y, en torno a 1748, enunció las leyes de conservación de la masa y la energía. Sin embargo, su obra fue prácticamente desconocida fuera de Rusia hasta mucho después de su muerte.

Thomas Wright: especulaciones sobre la Vía Láctea. Los descubrimientos de William y Caroline Herschel. John Michel

Se desarrollaron también teorías astronómicas que se adelantaban a su tiempo. El astrónomo de Durham Thomas Wright (1711-1786) publicó en 1750 An Original *Theory and New Hypothesis of the Universe (Teoría original y nuevas hipótesis sobre el universo),* en el que explicaba la aparición de la Vía Láctea sugiriendo que el Sol forma parte de un disco de estrellas que él comparaba con una rueda de molino. Era el mismo Wright cuyo «trabajo cotidiano» como agrimensor le había puesto en contacto con Charles y Elenry Cavendish. En 1781, William (1738-1822) y Caroline (1750-1848) Herschel descubrieron el planeta Urano, causando este descubrimiento un gran revuelo en aquella época, ya que se trataba del primer planeta que no habían conocido los antiguos y apuntaba la posibilidad de hacer nuevos descubrimientos más allá de las viejas fronteras del sistema solar. Por otra parte, John Michell (1724-1793), un buen amigo de Elenry Cavendish, fue, como es sabido hoy en día, la primera persona que dio con el concepto de lo que actualmente llamamos agujeros negros, y lo hizo público en un informe que Cavendish leyó en 1783 ante la Royal Society en nombre de Michell.[4] La idea de Michel] estaba basada sencillamente en el hecho, claramente demostrado ya por aquel entonces, de que la luz tiene una velocidad finita y en la propiedad de que, cuanto mayor es la masa de un objeto, más rápido hay que moverse para escapar de su fuerza de atracción gravitatoria. Merece la pena incluir aquí una cita de aquel informe, aunque sólo sea por imaginamos a Elenry Cavendish, en otras ocasiones tímido, metido en su elemento, leyendo ante una multitud en la Royal Society:

> Si en la naturaleza existieran realmente cuerpos cuya densidad no fuera menor que la del Sol, y cuyos diámetros fueran más de 500 veces el diámetro del Sol, dado que su luz no podría llegar hasta nosotros… nos sería imposible tener información visual; sin embargo, si cualesquiera otros cuerpos luminosos estuvieran girando en órbitas en torno a ellos, quizá a partir de los movimientos de esos cuerpos luminosos podríamos deducir la existencia de los que ocupan el centro de dichas órbitas.

De hecho, es así como los astrónomos deducen actualmente la existencia de los agujeros negros —estudiando el movimiento de los materiales brillantes que estén en órbita alrededor del agujero negro.

Dado que estamos acostumbrados a pensar que la idea de agujero negro es el ejemplo por excelencia de la teorización propia del siglo XX, resulta bastante sorprendente que alguien diera con tal concepto antes del final del siglo XVIII —y, aún resulta más sorprendente que una segunda persona, de manera independiente, tuviera la misma idea antes de que el siglo tocara a su fin—. Esta segunda persona fue Pierre Simon Laplace, y creo conveniente frenar un poco la marcha de nuestro relato para valorar tranquilamente hasta qué punto había llegado la física a finales del siglo XVIII examinando un poco más minuciosamente la carrera del hombre al que a veces se llama el «Newton francés».

Pierre-Simon Laplace, «el Newton francés»: su obra «Exposition»

Laplace nació en Beaumont-en-Auge, cerca de Caen, en la región de Calvados, Normandía, el 28 de marzo de 1749. Se sabe poco sobre los primeros años de su vida, —en realidad no se sabe mucho sobre su vida privada en general—. Algunos textos hablan de que procedía de una familia pobre de granjeros, pero, aunque sus padres no eran ricos, vivían con ciertas comodidades. Su padre, llamado también Pierre, estaba en el negocio de

la sidra, aunque no a gran escala, y también ejercía como magistrado local, lo cual da una idea clara de su posición dentro de la comunidad. Su madre, Marie-Anne, procedía de una familia de granjeros ricos de Tourgéville. Del mismo modo que a Laplace le pusieron el nombre de su padre, a su única hermana, nacida en 1745, la bautizaron como Marie-Anne, el nombre de su madre. Laplace asistió a clase como alumno externo en un colegio local regido por los benedictinos y es probable que su padre quisiera orientarle hacia el sacerdocio. Desde 1766 hasta 1768 estudió en la Universidad de Caen y parece ser que fue allí donde se descubrió que el muchacho tenía talento para las matemáticas. Contribuyó a su mantenimiento en el colegio trabajando como preceptor privado y hay algunos indicios de trabajó brevemente en estas funciones para el marqués D'Héricy, el mismo que iba a desempeñar un papel tan importante en la vida de Georges Cuvier. Laplace abandonó Caen sin conseguir título académico alguno y fue a París con una carta de uno de sus profesores que le recomendaba a Jean D'Alembert (1717-1783), uno de los matemáticos más destacados de Francia en aquella época y un miembro de alto rango de la Academia de las Ciencias. D'Alembert quedó bastante impresionado por la capacidad del joven y le encontró una plaza con el sonoro título de profesor de matemáticas en la Ecole Militaire, pero este trabajo en realidad consistía en intentar inculcar los rudimentos de la materia a unos cadetes reacios a asimilarlos. Ocupó esta plaza desde 1769 hasta 1776, ganándose una buena reputación con una serie de publicaciones sobre matemáticas (como siempre que se trata de matemáticas, no entraremos en detalles al respecto), y fue elegido miembro de la Academia en 1773.

Laplace estaba especialmente interesado por la probabilidad y fue este interés matemático el que le llevó a investigar problemas relacionados con el sistema solar, tales como la naturaleza

concreta de las órbitas de los planetas y de la que describe la Luna alrededor de la Tierra. ¿Podía ser que estas órbitas hubieran surgido por casualidad? ¿O debía haber alguna razón física que determinara las propiedades que tenían? Un ejemplo que Laplace comentó en 1776 fue el relativo a la naturaleza y las órbitas de los cometas. Todos los planetas se mueven alrededor del Sol en la misma dirección y en el mismo plano (el plano de la eclíptica). Esto indica claramente (más tarde veremos con cuánta claridad) que todos ellos se agruparon por un mismo proceso físico. Sin embargo, los cometas describen órbitas en torno al Sol en todas las direcciones y con todos los ángulos, al menos juzgando por la evidencia de las pocas docenas de cometas cuyas órbitas se conocían en aquellos tiempos. Este hecho sugiere que tienen un origen diferente, y a esta conclusión habían llegado ya matemáticos anteriores a Laplace. No obstante, como matemático, a Laplace no le preocupaba tanto la conclusión como el modo en que se había llegado a ella; desarrolló un análisis más sofisticado que demostraba de manera probabilística lo improbable que era la existencia de alguna fuerza que intentara hacer que los cometas se movieran en el plano de la eclíptica. A mediados de la década de 1770, Laplace también examinó por primera vez el comportamiento de las órbitas de Júpiter y Saturno.[5] Estas órbitas presentaban una ligera variación a largo plazo que no parecía encajar en las predicciones de la teoría gravitatoria de Newton, y el propio Newton había sugerido que, después de un tiempo suficientemente largo (sólo unos pocos cientos de años) sería necesaria la intervención divina para volver a colocar a los planetas en sus verdaderas órbitas y evitar que el sistema solar se desmembrase. En su primer intento por resolver el rompecabezas, Laplace no encontró la respuesta, pero cuando volvió a abordar el problema, en la década de 1780, demostró de forma concluyente que aquellas variaciones que tardaban siglos en producirse, o varia-

ciones seculares, que es como se llaman, pueden explicarse en el marco de la teoría de Newton y están causadas por las influencias perturbadoras que ejercen mutuamente, el uno sobre el otro, los dos planetas. Estas variaciones siguen un ciclo de 929 años, al cabo de los cuales todo vuelve a su estado inicial, de tal forma que el sistema solar después de todo es estable (al menos en todo salvo a escalas de tiempo más largas). Según la leyenda, cuando Napoleón le preguntó por qué Dios no aparecía en este tema de las variaciones seculares, Laplace respondió «no necesito esa hipótesis».

Laplace también trabajó en la teoría de las mareas, explicando por qué las dos mareas alcanzan cada día aproximadamente la misma altura (otros cálculos más ingenuos «predecían» que una marea alta debía ser mucho más alta que la otra). Asimismo desarrolló sus teorías sobre probabilidad para poder tratar problemas prácticos tales como calcular la población total de Francia a partir de una muestra de estadísticas de nacimientos y, como ya hemos visto, trabajó con Lavoisier sobre el estudio del calor. Lavoisier era casi seis años mayor que Laplace y estaba entonces en su cota más alta de buena reputación científica. Un aspecto interesante del estado de la ciencia en la década de 1780 es que, aunque Lavoisier y Laplace, indudablemente dos de los científicos más grandes de su tiempo, explicaban sus resultados experimentales en términos del viejo modelo calórico del calor (pronto veremos más sobre esto) y de la nueva teoría cinética, sin embargo evitaban cuidadosamente optar por uno solo de estos planteamientos e incluso llegaban a sugerir que ambos podían funcionar al mismo tiempo.

En 1788, se abre un resquicio por el que se puede observar algo de la vida privada de Laplace. El 15 de mayo, estando ya sólidamente instalado como miembro destacado de la Academia de las Ciencias, contrajo matrimonio con Marie-Charlotte de Courty de Romanges. Tuvieron dos hijos. El hijo varón,

Charles-Emile, nació en 1789, llegó a general y falleció sin dejar descendencia en 1874; la hija, Sophie Suzanne, murió en 1813, al dar a luz a su propia hija, la cual sobrevivió. En torno a la época de su matrimonio fue cuando Laplace hizo su estudio definitivo de los movimientos planetarios. Al mismo tiempo que explicaba las variaciones seculares de las órbitas de Júpiter y Saturno, resolvió un rompecabezas que llevaba largo tiempo planteado, relativo a cambios similares observados en la órbita que describe la Luna en torno a la Tierra, demostrando que estos cambios están producidos por una complicada interacción entre el Sol y el sistema Tierra —Luna y la influencia gravitatoria de los otros planetas sobre la órbita de la Tierra—. En abril de 1788, podía ya afirmar lo siguiente, utilizando la palabra *mundo* donde nosotros diríamos «sistema solar»:

> El sistema del mundo sólo oscila alrededor de un estado principal del que nunca se desvía, salvo en cantidades muy pequeñas. En virtud de su constitución y de la ley de la gravedad, disfruta de una estabilidad que sólo puede ser rota por causas ajenas, y estamos seguros de que la acción ejercida es indetectable desde los tiempos de las más antiguas observaciones, hasta nuestros días.

Aunque sabemos poco sobre su vida privada, está claro que Laplace fue un hábil superviviente, y una razón por la que sabemos tan poco es que nunca criticó abiertamente a un gobierno ni estuvo implicado en política. Sobrevivió a las distintas formas de gobierno que se fueron sucediendo tras la Revolución Francesa, la mayoría de las cuales estuvieron deseosas de establecer una relación con este científico que era un símbolo del prestigio francés. En el único momento en que podía haber corrido un riesgo, durante el Terror, Laplace había visto con anterioridad de qué lado soplaba el viento y se había trasladado prudentemente junto con su familia a Melun, a unos 50 km al sudeste de París. Allí estuvo refugiado discretamente hasta que, después de la caída de los jacobinos, fue llamado para que vol-

viera a París a trabajar en la reorganización de la ciencia bajo el Directorio.

Antes del interludio jacobino, Laplace había estado ya trabajando sobre el sistema métrico; después, su trabajo sobre una reforma del sistema educativo francés, encaminada a incluir en él una enseñanza adecuada de la ciencia, le llevó a escribir uno de los libros más importantes sobre la ciencia que se han publicado nunca, la *Exposition da systéme du monde* (*Exposición del sistema del mundo)*, que se editó en dos volúmenes en 1796. El prestigio de Laplace y su habilidad para amoldarse a las circunstancias le valieron para ejercer sus funciones en el gobierno establecido bajo el dominio de Napoleón, que le otorgó el título de conde en 1806, pero también para seguir gozando de favores tras la restauración de la monarquía, con Luis XVIII, que le nombró marqués de Laplace en 1817. Sin embargo, a pesar de que continuó trabajando en matemáticas y de todos los honores con que le colmaron a lo largo de su vida, hasta que murió en París el 5 de marzo de 1827; en cuanto al desarrollo de la ciencia la *Exposition du systéme du monde* siguió siendo el logro más importante de Laplace, que aún es válido hoy en día como compilación que ilustra la situación en que se encontraba la física a finales del siglo XVIII. Esta obra también fue apreciada en su época —en la guarda de una copia donada al College of New Jersey (actualmente la Universidad de Princeton) en 1798, el donante había escrito:

> Este tratado, considerando su objeto y su extensión, reúne (en un grado muy superior al que pudiera alcanzar cualquier otro trabajo sobre el mismo tema que hayamos visto nunca) claridad, orden y exactitud. Resulta familiar sin ser ambiguo; es preciso, pero no abstruso; su materia parece extraída de una amplia reserva almacenada en la mente del autor; y esta materia está impregnada con el auténtico espíritu de la filosofía.[6]

La base fundamental de esa filosofía estaba enunciada por el propio Laplace en su gran obra y suena actualmente aún más

auténtica que en cualquier otro momento durante los dos últimos siglos:

> La sencillez de la naturaleza no se puede medir por la de nuestras concepciones. La naturaleza, infinitamente variada en sus efectos, es sencilla sólo en sus causas, y su economía consiste en producir un gran número de fenómenos, a menudo muy complicados, que obedecen todos ellos a un pequeño número de leyes generales.

Aquí habla la voz de la experiencia en boca de un hombre que explica las complejidades del sistema solar basándose en la sencilla ley de la gravedad de Newton.

La recopilación de Laplace resume la física desde la astronomía planetaria, el movimiento orbital y la gravedad, hasta la mecánica y la hidrostática, para llegar justo al final a introducir un par de ideas nuevas (o casi nuevas). Una de ellas es la llamada «hipótesis nebular» [o «hipótesis cosmogónica»] para explicar el origen del sistema solar, que también fue elaborada por Immanuel Kant (1724-1804) en 1755, aunque no hay indicios de que Laplace hubiera sabido algo sobre el entonces bastante desconocido trabajo de Kant. Se trata de la teoría según la cual los planetas se habrían formado a partir de una nube de materia que se encontraba rodeando a un joven Sol, una materia que se contrajo hasta quedar en el plano ecuatorial de aquella nube, o nebulosa, cuando esta se condensó. En aquella época se conocía la existencia de siete planetas y catorce satélites que orbitaban todos ellos alrededor del Sol en la misma dirección. De ocho de estos sistemas se sabía también que rotaban en torno a sus ejes en el mismo sentido en que orbitaban alrededor del Sol —si miramos hacia el polo Norte de la Tierra, por ejemplo, vemos que la Tierra gira sobre su eje en sentido contrario a las agujas del reloj, mientras el planeta gira alrededor del Sol también en sentido contrario a las agujas del reloj. Laplace calculó que, puesto que hay una posibilidad entre dos de que cada órbita o cada rotación sea «hacia adelante» en vez de «hacia atrás»,

la probabilidad total de que esto no suceda por azar sería $[1 - (1/2)^{29}]$, un número tan cercano a la unidad que se podía hablar de certeza de que aquellos cuerpos se hubieran formado al mismo tiempo, y la hipótesis cosmogónica parecía la mejor forma de explicar esto. De hecho, es el modelo que todavía se prefiere actualmente.

La otra idea nueva fue, por supuesto, la versión que dio Laplace sobre los agujeros negros. Lo que resulta intrigante es que esta exposición (que era en líneas generales muy parecida a la de Michell, pero mucho más breve) aparece sólo en la primer edición de la *Exposition du systéme du monde*; sin embargo, no consta en ningún sitio la razón por la cual Laplace la suprimió en ediciones posteriores. Su versión de la hipótesis relativa a estas estrellas oscuras señalaba que un cuerpo con un diámetro que fuera 250 veces el del Sol y con la misma densidad que la Tierra ejercería una atracción gravitatoria tan fuerte que ni siquiera la luz podría escapar de él.[7] En realidad esto no pasa de ser una curiosidad histórica, ya que esta especulación no influyó en el desarrollo de la ciencia del siglo XIX. Pero sí que influyó el libro en su conjunto, no sólo por su contenido, sino por su claridad y su estilo fluido, que se ponen de manifiesto desde las primeras frases, con las que Laplace consigue ya enganchar a sus lectores:

> Si durante una noche clara y en un lugar donde se pueda ver todo el horizonte contemplamos el espectáculo de los cielos, lo veremos cambiar a cada momento. Las estrellas surgen o desaparecen. Algunas empiezan a mostrarse por el este, otras desaparecen por el oeste. Otras, como la estrella polar y la Osa Mayor, nunca tocan el horizonte en nuestra región…

¡Cómo podría alguien resistirse a leerlo!

El relato de Laplace es casi todo ciencia y muy poco sobre su personalidad, aunque algo de esto parece traslucirse a lo largo de la *Exposition du systéme du monde*. Pero no debemos quedarnos con la idea de que a finales del siglo XVIII la física, por no

hablar del resto de la ciencia, se había convertido en cierto tipo de rutina insulsa. Había todavía gran cantidad de «personajes» en escena y, entre todos los físicos del siglo XVIII, la carrera más pintoresca fue la de Benjamin Thompson, que posteriormente sería el conde Rumford. Realizó importantes contribuciones a la ciencia, especialmente en el estudio del calor, y otras contribuciones no menos importantes como reformador social, aunque éstas no estuvieron motivadas por la política, sino por el sentido práctico. De hecho, Thompson parece haber sido un oportunista, motivado en gran medida por sus intereses personales, y resulta paradójico que el mejor camino que encontró para fomentar su propia riqueza y mejorar su estatus social fuera hacer el bien a los demás. Sin embargo, dado que su carrera se desarrolló entre la revolución americana y las agitaciones europeas de finales del siglo XVIII, así como por ser en sí misma una historia divertida, vale la pena entrar en detalles más allá de lo que justificaría realmente su mera aportación a la ciencia.

Benjamín Thompson (conde Rumford): su vida

Thompson nació el 26 de marzo de 1753 como hijo de un granjero de Woburn, Massachusetts. Su padre murió poco después de nacer Benjamin, y su madre pronto volvió a casarse y tuvo varios hijos más. Aunque Benjamin Thompson fue un niño inquisitivo e inteligente, la familia era pobre y lo único que les permitía su posición era dar al niño la educación más rudimentaria. Desde los 13 años de edad tuvo que trabajar para contribuir al mantenimiento de su numerosa familia, primero como empleado de un importador de artículos de mercería en el puerto de Salem, y posteriormente, desde octubre de 1769, como dependiente en un comercio de Boston. Parte del atractivo que tenía Boston para el muchacho era que le ofrecía la

oportunidad de asistir a clases nocturnas, además de ser también un semillero de inquietudes políticas, cosa que no dejaba de ser emocionante para un adolescente; pero Benjamin Thompson descuidó su trabajo, que le aburría mortalmente, y no tardó en perder la colocación —según unas versiones fue despedido y según otras renunció a aquel puesto de trabajo voluntariamente—. En cualquier caso, el hecho es que pasó la mayor parte del año 1770 en su casa de Wobum, sin empleo, repartiendo su tiempo entre las aficiones habituales de los adolescentes, y un intento de educarse por su cuenta con la ayuda de un amigo ligeramente mayor que él, Loammi Baldwin. En parte debido a su encanto personal y en parte porque estaba claramente interesado en lo que todavía, en aquella parte del mundo, se llamaba filosofía natural, consiguió que el médico local, el doctor John Hay, se aviniera a aceptarle como aprendiz, y Thompson aprovechó la oportunidad para compaginar sus tareas con un programa de estudios personal —parece ser que incluso asistió a unas pocas clases magistrales en Harvard, aunque no tenía relación oficial alguna con esta universidad—. Sin embargo, dado que esto está basado en relatos del propio Thompson, es conveniente, como veremos más adelante, cogerlo con pinzas.

El problema de ser un aprendiz era que costaba dinero, por lo cual, con el fin de satisfacer sus necesidades económicas, Thompson tuvo que recurrir a diversos empleos docentes a tiempo parcial —dado que todo lo que se le pedía que enseñase era leer, escribir y algo de cuentas, no necesitaba títulos oficiales para poder desempeñar estos trabajos—. Cuando llegó el verano de 1792, sucedió que, o bien Thompson se había cansado ya de ser un aprendiz, o el doctor se había cansado de él, por lo que el joven se decidió a trabajar como maestro de escuela con dedicación plena. Encontró un puesto de trabajo en la ciudad de Concord, New Hampshire. En realidad, esta ciudad se

encontraba situada en la frontera entre Massachusetts y New Hampshire, y previamente se había llamado Rumford y había formado parte de Massachusetts; su nombre cambió a finales de 1762 como un gesto conciliatorio después de una feroz disputa sobre la pertenencia de la ciudad a un Estado o a otro y sobre qué Estado tenía que ser el perceptor de los impuestos. El patrono de Thompson en Concord fue el reverendo Timothy Walker. La hija de Walker, Sarah, se había casado recientemente —y a una edad bastante avanzada para la época, 30 años— con el hombre más rico de la ciudad, Benjamin Rolfe, que había muerto poco después, a los 60 años de edad, dejando a su viuda en una muy buena situación económica. La enseñanza en la escuela le duró a Thompson aún menos que cualquiera de los otros trabajos anteriores, ya que en noviembre de 1772 se casó con Sarah Walker Rolfe, se dedicó a administrar el patrimonio de su esposa y se convirtió en un caballero. Tenía sólo 19 años, era alto y de buen ver, y siempre decía que había sido Sarah la que había llevado la voz cantante en su relación. Tuvieron solamente una hija, Sarah, que nació el 18 de octubre de 1774. Sin embargo, para entonces la vida de Thompson ya había comenzado a dar otro giro.

El problema con Thompson era que nunca estaba satisfecho con lo que había conseguido y siempre quería más, o al menos así fue hasta los últimos meses de su vida. Thompson no perdió el tiempo y rápidamente se congració con el gobernador local, John Wentworth. Le propuso organizar una expedición científica para explorar las cercanas White Mountains, aunque estos planes nunca llegaron a dar fruto, y puso en marcha un programa de agricultura científica. Pero, todo esto se desarrollaba con el trasfondo de las agitaciones que desembocaron en la Revolución Americana. Aunque éste no es aquí el tema, y no entraremos en detalles, sí que vale la pena recordar que en sus primeras fases esta revolución fue en gran medida una disputa entre

dos escuelas de pensamiento cuyos partidarios, tanto los de una como los de la otra, se consideraban a sí mismos ingleses leales. Thompson apostó por las autoridades gobernantes y en este contexto recibió en 1773, unos pocos meses después de contraer matrimonio, un nombramiento como comandante de la milicia de New Hampshire, algo que en otras circunstancias habría resultado sorprendente. Como parte de los preparativos para una lucha que la mayoría reconocían como inevitable, los colonos (por llamarlos de alguna manera) animaban, o más bien sobornaban, a los soldados del ejército británico a que desertaran, se unieran a sus filas y los entrenaran para combatir de manera organizada; el comandante Thompson, siendo un terrateniente con muchos contactos entre los granjeros de la región, estaba en una situación ideal para espiar estas actividades. Dado que Thompson era además bastante extrovertido a la hora de expresar su creencia en que el auténtico patriotismo significaba obedecer el gobierno de la ley y trabajar dentro de ésta para realizar cambios, no pasó mucho tiempo antes de que los que conspiraban para derrocar el viejo régimen se dieran cuenta de las actividades que estaba llevando a cabo. Poco antes de las Navidades de 1774, justo un par de meses después del nacimiento de su hija, tras saber que una muchedumbre se estaba reuniendo con el propósito de emplumarlo, Thompson abandonó la ciudad al galope para no volver jamás. Nunca volvió a ver a su esposa, aunque, como ya veremos, su hija Sarah posteriormente entró de nuevo en su vida.

Thompson se dirigió a Boston, donde ofreció sus servicios al gobernador de Massachusetts, el general Thomas Gage. Oficialmente, su oferta fue rechazada y Thompson regresó a Wobum. En realidad, se había convertido en un espía de las autoridades británicas y pasaba información sobre las actividades de los rebeldes al cuartel general de Boston. Al poco tiempo, su posición en Wobum se hizo también insostenible y, en octubre

de 1775, se reunió de nuevo con los británicos en Boston. Cuando fueron expulsados por los rebeldes en marzo de 1776, la mayor parte de la guarnición y de los legitimistas se trasladaron por mar a Halifax, Nueva Escocia, mientras los despachos oficiales procedentes de Boston con las desagradables noticias sobre el revés sufrido por las fuerzas británicas eran enviados a Londres, siendo portador de los mismos el juez William Brown. De algún modo, el comandante Benjamín Thompson se las arregló para conseguir incorporarse al séquito del juez Brown y llegó a Londres durante el verano de 1776 como un experto que disponía de información de primera mano sobre la capacidad combativa de los rebeldes americanos y como testigo de la caída de Boston desde el bando americano. Además, se presentó como un caballero que había perdido sus extensas propiedades por su lealtad a la causa de los británicos. Con estas credenciales y su propia e impresionante capacidad organizativa, se convirtió rápidamente en la mano derecha de lord George Germain, ministro de Asuntos Coloniales.

Thompson era bueno en su trabajo y tuvo mucho éxito, por lo que en 1780 se convirtió en viceministro para el Departamento del Norte. Sin embargo, estas actividades como funcionario quedan fuera del objeto de este libro. Sin embargo, al mismo tiempo, volvió a dedicarse a sus intereses científicos y, a finales de la década de 1770, llevó a cabo varios experimentos para medir la fuerza explosiva de la pólvora (un trabajo que en aquella época era obviamente de gran actualidad y relevancia), lo que le llevó a ser elegido miembro de la Royal Society en 1779. Estos experimentos también proporcionaron a Thompson la excusa para pasar tres meses de maniobras con parte de la armada británica durante el verano de 1779; sin embargo, aunque para guardar las apariencias se dedicaba al estudio de la artillería, en realidad Thompson estaba, una vez más, trabajando como espía, ahora para lord Germain, informando sobre ca-

sos increíbles, pero ciertos, de ineficacia y corrupción dentro de la armada, una información que Germain pudo utilizar para fomentar su propia carrera política. Sin embargo, Thompson era plenamente consciente de que, bajo el sistema de mecenazgo que existía en aquella época, su estrella estaba estrechamente ligada a la de Germain, y que si su patrocinador caía en desgracia, él también se quedaría a la intemperie. En consecuencia, se dedicó a prepararse su propia salida, por si tenía que batirse en retirada.

Una táctica típica para alguien de su posición era formar su propio regimiento. Con el fin de incrementar la fuerza del ejército para cuando fuera necesario, el rey podía conceder una Carta Real para autorizar a un individuo a reclutar un regimiento y convertirse en el mando supremo del mismo, siempre y cuando dicho individuo corriera con los gastos necesarios. Fue un procedimiento caro, pero Thompson podía permitírselo en aquellos momentos, y reportaba enormes beneficios —al terminar las hostilidades, cuando el regimiento se disolvía, los oficiales conservaban su rango y tenían derecho a cobrar una media paga vitalicia—. Así, Thompson se convirtió en teniente coronel de los Dragones Americanos del rey, que de hecho fueron reclutados para Thompson en Nueva York por el comandante David Murray. Sin embargo, en 1781, los servicios militares que Thompson pretendía realizar se convirtieron de repente en un hecho. Pero, se capturó a un espía francés que disponía de detalles relativos a las operaciones navales británicas y estaba claro que su información procedía de algún alto cargo que conocía con detalle la flota. Thompson figuró como sospechoso y hubo muchos comentarios, pero nadie presentó cargos contra él. Nunca llegaremos a conocer la verdad, pero es un hecho que Thompson abandonó bruscamente el cargo que tenía en Londres y se trasladó a Nueva York para tomar parte activa en el conflicto junto con su regimiento. El papel que desempe-

ñó Thompson en la lucha no fue glorioso ni triunfal y, en 1783, después de la derrota de los británicos, volvió a Londres, donde sus amigos tenían todavía influencia suficiente para conseguir que fuera promovido a coronel, con lo que aumentaba sus ingresos considerablemente, antes de retirarse con media paga. Justo después de su ascenso, se hizo retratar de uniforme por el pintor Thomas Gainsborough.

El coronel Thompson, como se le llamaba ya entonces, decidió a continuación probar fortuna en el continente europeo y, después de unos meses recorriendo Europa para calibrar las posibilidades, con una combinación de encanto personal, suerte y unos relatos bastante exagerados sobre sus hazañas militares, consiguió que el elector de Baviera, Carl Theodor, le ofreciera un puesto como ayudante de campo en Munich. Al menos casi le ofrecieron un puesto. Se le dio a entender que, con el fin de evitar ofender a otros miembros de la corte bávara, sería conveniente que Thompson pudiera ser considerado como alguien que tenía buenas relaciones con el rey de Gran Bretaña, Jorge III. En cualquier caso, como coronel del ejército británico, tendría que regresar a Londres con el fin de obtener permiso para servir a una potencia extranjera. Mientras estuvo allí, Thompson persuadió al rey de que sería para él una gran ayuda ser nombrado caballero y se le otorgó este favor a su debido tiempo. Thompson consiguió casi siempre lo que deseaba, pero esta impresionante osadía tuvo éxito en gran medida por el hecho de que Gran Bretaña estaba profundamente interesada en mejorar sus relaciones con Baviera a la vista del modo en que estaba evolucionando entonces (en 1784) la situación política en Francia. También está claro, y difícilmente puede sorprender, dados sus antecedentes, que Sir Benjamín se ofreció para espiar a los bávaros por cuenta de los británicos, remitiendo informes en secreto a Sir Robert Keith, el embajador británico en Viena.

Thompson tuvo un éxito extraordinario en Baviera, al aplicar principios científicos para convertir a un ejército pobremente equipado, con la moral baja, poco más que un grupo de gente alborotada, en una maquinaria eficiente y alegre, aunque no una maquinaria de combate. Su tarea, aparentemente imposible, era conseguir esto al tiempo que le ahorraba dinero al elector, y lo consiguió aplicando la ciencia. Como los soldados necesitaban uniformes, Thompson estudió el modo en que el calor se transmitía a través de diferentes tipos de materiales, con el fin de encontrar la opción que ahorrara más costes a la hora de vestir a las tropas. Mientras trabajaba en esto, descubrió accidentalmente las corrientes de convección,[8] cuando observó que, en un largo termómetro que estaba utilizando en sus experimentos, el líquido (alcohol) contenido en dicho termómetro ascendía hacia el centro del tubo y descendía a los lados. Los soldados necesitaban también alimentarse, por lo tanto Thompson estudió el tema de la nutrición y consiguió idear un modo de alimentar a las tropas de manera económica, pero saludable. Para confeccionar los uniformes, vació de mendigos las calles de Munich y los puso a trabajar con lo que para lo que se estilaba en la época eran buenos equipamientos y en talleres limpios, donde también se les proporcionaba una educación rudimentaria y se obligaba a los niños a asistir a una especie de escuela. Con el fin de conseguir para las tropas un máximo de nutrición con un coste mínimo, entre otras cosas los alimentó con su sopa nutritiva —basada en la patata, una hortaliza poco utilizada entonces en aquella parte de Europa—, que requería que cada cuartel tuviera una huerta donde los soldados cultivaran sus propias verduras. Esto aportó a los soldados un trabajo práctico y el aprendizaje de ciertas técnicas que luego podrían utilizar cuando abandonaran el ejército, y además contribuyó

bastante a levantarles la moral. Concretamente en Munich, la huerta militar quedó incorporada a un gran parque público, que llegó a ser conocido como el Jardín Inglés, instalado en lo que había sido un parque privado del elector donde se criaban venados. La creación de este parque público contribuyó a hacer que Thompson fuera muy popular entre el pueblo llano.

Entre sus muchos inventos, Thompson diseñó las primera cocinas económicas cerradas, que sustituyeron a las ineficaces cocinas de chimenea abierta; también diseñó cocinas económicas portátiles que podían usarse en el campo, unas lámparas perfeccionadas y, posteriormente, unas cafeteras muy eficientes (Thompson, que fue abstemio durante toda su vida y odiaba el té, era un promotor entusiasta del café, al que consideraba una alternativa saludable al alcohol). Su posición oficial en la Corte le convirtió en el hombre más poderoso de Baviera, después del elector, y no tardó demasiado en ocupar simultáneamente los cargos de ministro de la Guerra, ministro del Interior, consejero de Estado y chambelán de la Corte, ostentado además el rango de general de división. En 1792, el elector encontró otro modo de ayudar a su más fiel ayudante. En aquella época, existían todavía los últimos vestigios del Sacro Imperio Romano, en forma de coalición un tanto deshilvanada de los estados de Europa Central, con un «emperador» cuyo papel no era más que ceremonial. Aquel año falleció el emperador Leopoldo II y, mientras las cabezas coronadas se reunían para elegir un sucesor, Carl Theodor se convirtió en el emperador provisional del Sacro Imperio, siguiendo el sistema del turno de Buggins[*] vigente en la época. Ocupó el cargo desde el 1 de marzo al 14 de julio de 1792, el tiempo suficiente para conceder títulos de nobleza a unos cuantos de sus favoritos, entre los que figuraba el general de división sir Benjamín Thompson, que se convirtió en el conde de Rumford (en alemán Graf von Rumford, un título inverosímil para un científico angloamericano).[9]

Aunque, como este ejemplo indica, Rumford (que es como le llamaremos de ahora en adelante) seguía siendo el ojo derecho del elector, su posición como un extranjero que había llegado tan lejos en tan poco tiempo le hizo ganarse muchos enemigos en la Corte. Carl Theodor era viejo y no tenía hijos, por lo que las distintas facciones ya estaban realizando maniobras con el fin de tomar posiciones para cuando sucediera lo inevitable. Rumford había conseguido tanto que aparentemente le quedaba poco recorrido para seguir ascendiendo en la escala social. Tenía 39 años y estaba empezando a pensar en la posibilidad de regresar a América, cuando recibió, de repente, una carta de su hija Sarah, a la que habitualmente llamaban Sally. La esposa de Rumford acababa de morir y Loammi Baldwin había dado a Sally la dirección de su padre. En noviembre de 1792, cuando los franceses invadieron Renania, tomaron el poder en Bélgica y la guerra amenazaba con extenderse a Baviera, Rumford, que estaba realmente exhausto, se sintió harto y marchó a Italia, oficialmente a causa de su mala salud, pero en realidad lo hizo más bien por conveniencia política. Su estancia en Italia fue en parte un período de vacaciones, y por otra parte una ocasión para reavivar su interés por la ciencia. Rumford presenció cómo Volta demostraba que las patas de las ranas experimentaban contracciones al estar sometidas al influjo de la electricidad y conoció a sir Charles Blagden, secretario de la Royal Society y amigo de Henry Cavendish. Italia fue también una ocasión para el flirteo romántico. A Rumford nunca le faltó compañía femenina; tuvo varias amantes, entre ellas dos hermanas, ambas condesas, y a una de ellas la «compartió» con el elector. Además fue padre de al menos dos hijos ilegítimos.

Rumford pasó dieciséis meses en Italia, pero regresó a Baviera durante el verano de 1794, en esta ocasión con el propósito de hacerse un nombre como científico —no era como Henry Cavendish, que se conformaba con hacer los descubrimientos

para sí mismo, sin buscar aclamaciones públicas. La situación política seguía siendo la misma y, en cualquier caso, para que la obra de Rumford se diera a conocer lo mejor habría sido publicarla en Inglaterra y, preferentemente, que la Royal Society se encargar de la publicación. En el otoño de 1795, el elector le concedió permiso para ausentarse durante seis meses, con el fin de que pudiera viajar a Londres para publicar su obra. Allí, siendo ya famoso como científico y estadista, y con un título nobiliario, Rumford se sentía en su propio elemento y prolongó la estancia de seis meses a casi un año entero. Como siempre, combinaba los negocios, su promoción personal, la ciencia y el placer. Impresionado por la capa de humo que cubría Londres en invierno, utilizó sus conocimientos sobre la convección para diseñar chimeneas mejores, con una comisa o repisa en la parte de atrás de la chimenea, de tal forma que el aire frío que descendía por el conducto chocara contra dicha repisa y rebotara para unirse al aire caliente que ascendía desde el fuego, sin enviar nubes de humo al interior de la habitación. Posteriormente trabajó en el diseño de sistemas de calefacción central que usaban vapor. En 1796, en parte por egotismo, con el fin de perpetuar su propio nombre, aunque, todo hay que decirlo, utilizando su propio dinero, Rumford instituyó dos premios consistentes en medallas con dotación económica que se concederían a los trabajos destacados en los campos del calor y de la luz, uno en América y otro en Gran Bretaña. El mismo año, hizo que Sally viniera de América para reunirse con él y, aunque inicialmente le incomodaron sus modales paletos de muchacha de las colonias, porque resultaban embarazosos para el sofisticado conde Rumford, ambos pasaron juntos mucho tiempo mientras vivió el conde.

En agosto de 1796, Rumford fue llamado para que regresara a Munich, en parte porque la situación política había cambiado a su favor (el último presunto heredero de Carl Theodor res-

paldaba a Rumford) y en parte por las amenazas militares de que estaba siendo objeto Baviera, incluso la misma ciudad de Munich, ya que este Estado parecía estar atrapado en medio del enfrentamiento que tenía lugar entre los ejércitos de Austria y de Francia.[10] No es que se pensara realmente en Rumford para que hiciera un papel de gran líder militar, sino que el conde les iba muy bien como chivo expiatorio —casi toda la gente importante huyó de Munich, dejando al extranjero Rumford como comandante de la ciudad, con la idea de que sería él quien pagara el pato cuando la ciudad fuera invadida—. Pronto llegaron los austríacos y establecieron su campamento a un lado de la ciudad. Luego llegaron los franceses y montaron el suyo al otro lado. Ambos ejércitos estaban decididos a ocupar Munich y a no permitir que sus contrarios se apoderaran de la ciudad, pero Rumford, haciendo de lanzadera entre los dos campamentos e intentando ganar tiempo, consiguió evitar que se produjera un conflicto hasta que los franceses se marcharon como consecuencia de la derrota de otro de sus ejércitos en la Baja Renania. Rumford salió del apuro oliendo a rosas, como siempre. Cuando el elector regresó, le recompensó nombrándole comandante de la policía de Baviera y haciendo a Sally, que había acompañado a su padre, condesa de propio derecho, aunque de esto no se derivaron ingresos económicos extraordinarios, por lo que la pensión a la que Rumford tenía derecho como conde tuvo que ser dividida a partes iguales entre los dos. Aparte de esto, Rumford fue ascendido a general.

Sin embargo, este éxito inesperado hizo que Rumford fuera aún más impopular para la oposición, por lo que ya sólo pensaba en marcharse y descuidó sus tareas administrativas, pero por aquel entonces fue cuando llevó a cabo su trabajo científico más importante. Incluso el elector se dio cuenta de que su propia posición se estaba debilitando a causa de su actitud de favorecer continuamente a Rumford, pero ¿qué podía hacer con él?

En 1798 parecía que había encontrado por fin una solución que podía lavarle la cara: Carl Theodor nombró al conde Rumford ministro plenipotenciario en la Corte de St. James, es decir, embajador en Gran Bretaña. Rumford hizo el equipaje con todas sus pertenencias y regresó a Londres, pero se encontró con que Jorge III no tenía la más mínima intención de aceptar sus credenciales y se valió de la excusa de que una persona de nacionalidad británica no podía representar a un gobierno extranjero, pero probablemente el auténtico motivo fuera que Rumford no era del agrado de los ministros de Jorge III, ya que éstos le consideraban un advenedizo y recordaban muy bien sus anteriores manejos en el doble juego del espionaje.

Independientemente de cuál fuera el motivo, esta actitud tuvo un efecto positivo para la ciencia: Rumford empezó a sopesar, una vez más, la posibilidad de regresar a América, pero finalmente decidió quedarse en Londres, donde desarrolló un proyecto de crear una institución que fuera un museo (en el que, por supuesto, estuvieran especialmente bien representados sus propios trabajos) y, al mismo tiempo, un centro educativo y de investigación. La materialización de este proyecto fue la Royal Institution (RI). Tras recaudar los fondos necesarios mediante suscripción pública (es decir, utilizando su proverbial encanto para convencer a los ricos de que tenían que aflojar la bolsa), consiguió que la RI abriera sus puertas en 1800, inaugurándose con una serie de conferencias que pronunció Thomas Gamett, un físico que llegó procedente de Glasgow y al que se concedió el cargo de profesor de filosofía natural de la Royal Institution. Pero Gamett no duró mucho tiempo en el puesto — Rumford no quedó precisamente impresionado por su habilidad y en 1801, lo reemplazó por un joven que empezaba a destacar, Humphry Davy, quien haría que la RI consiguiera enormes éxitos en cuanto a fomentar el conocimiento de la ciencia entre el público en general.

Poco después del nombramiento de Davy, Rumford regresó a Munich para presentar sus respetos al nuevo elector, Maximiliano José, que había sucedido recientemente a Carl Theodor. Después de todo, aún cobraba del gobierno bávaro y Maximilian había expresado su interés por fundar en Munich una institución similar a la RI. Tras pasar allí un par de semanas, Rumford emprendió el viaje de regreso a Londres pasando por París, donde recibió todas las aclamaciones que él creía merecer y, cosas del destino, conoció a la viuda de Lavoisier, que entonces tenía poco más de cuarenta años, mientras que Rumford en aquel entonces se acercaba ya a los cincuenta.[11] Con todo esto, Londres perdió buena parte de su atractivo. Rumford puso en orden sus asuntos, hizo el equipaje y se trasladó definitivamente al continente el 9 de mayo de 1802. Posteriormente realizó otras visitas a Munich, pero éstas se acabaron en 1805, cuando Austria ocupó el territorio y el elector salió huyendo. Rumford había tomado la precaución de liquidar sus negocios allí antes de que estallara la tormenta; su corazón estaba entonces en París con madame Lavoisier. Esta se reunió con Rumford para realizar un largo recorrido por Baviera y Suiza, pero en la primavera de 1804 la pareja se instaló en una casa en París. Cuando ya habían decidido casarse surgió una dificultad técnica, ya que Rumford tenía que conseguir de América los documentos que demostraban que su primera esposa había fallecido; esto no resultó nada fácil en plena guerra y con el bloqueo que los británicos habían impuesto a Francia. Por este motivo, las cosas se retrasaron hasta el 24 de octubre de 1805, fecha en que finalmente contrajeron matrimonio, pero, casi de inmediato, descubrieron que eran incompatibles, a pesar de que previamente habían vivido cuatro años de relaciones prematrimoniales. Rumford estaba decidido a llevar una vida apacible, semirretirado y dedicado a la ciencia, mientras que su esposa deseaba asistir a fiestas y llevar una intensa vida social. Se

separaron después de un par de años y Rumford pasó el último tramo de su vida en una casa situada en las afueras de París, en Auteuil, dejándose consolar por otra amante, llamada Victoire Lefèvre. Tuvieron un hijo, Charles, que nació en octubre de 1813, menos de un año antes de la muerte de Rumford, que acaeció el 21 de agosto de 1814, cuando tenía 61 años de edad. Sally Rumford vivió hasta 1852, nunca se casó y dejó un sustancioso legado al hijo de Charles Lefèvre, Amédé, con la condición de que cambiara su apellido por Rumford. Sus descendientes aún se llaman así.

Las teorías de Thompson sobre el calor y el movimiento

Por muy fascinante que fuera la historia de Benjamin Thompson, conde Rumford, y aquí sólo la hemos relatado superficialmente, no habría un lugar para él en la historia de la ciencia si Rumford no hubiera hecho realmente una importante contribución al conocimiento de la naturaleza del calor. Todo surgió a partir del trabajo que estaba realizando en Munich en 1797, donde, como parte de su «defensa» de la ciudad y entre sus muchas responsabilidades, estaba al cargo del arsenal de la ciudad, un lugar en el que se fabricaban cañones horadando cilindros de metal.

Rumford fue durante toda su vida un hombre decididamente inclinado a las cuestiones prácticas: tenía más de inventor e ingeniero al estilo de James Watt que de teórico como Newton; su principal interés científico era todo lo relacionado con la naturaleza del calor, que seguía siendo en gran medida un misterio en aquella segunda mitad del siglo XVIII. El modelo que todavía asumían muchos científicos era la idea de que el calor iba asociado a un fluido llamado calórico. Se pensaba que todo cuerpo poseía este calórico y, cuando el calórico fluía saliendo

del cuerpo, dicho calórico anunciaba su presencia aumentando la temperatura.

Rumford se interesó por el modelo del calórico cuando estaba realizando experimentos con pólvora a finales de la década de 1770. Observó que el tubo del cañón se calentaba más cuando se disparaba sin cargar previamente una bala de cañón, que cuando se disparaba realmente la bala, aunque se utilizara la misma cantidad de pólvora en ambos procesos. Si el aumento de temperatura se hubiera debido únicamente a la emisión de calórico, entonces este aumento tendría que haber sido siempre el mismo, si se quemaba la misma cantidad de pólvora, por lo que había algo que no cuadraba en el modelo del calórico.[12] También había otros modelos que hacían la competencia al del calórico. En su juventud, Rumford había leído la obra de Herman Boerhaave (1668-1738), un holandés al que se recuerda sobre todo por sus trabajos de química, en los que sugería que el calor era una forma de vibración, como el sonido. A Rumford esta teoría le resultó más atractiva, pero no pudo encontrar argumentos para convencer a los demás de la deficiencias del modelo del calórico hasta veinte años más tarde, cuando se vio relacionado con los trabajos de perforación de tubos de cañón.

Desde luego, con el modelo del calórico resultaba muy fácil dar una explicación, aunque fuera superficial, para el conocido hecho de que la fricción produce calor —según este modelo, la presión que ejercen mutuamente dos superficies al frotarse la una con la otra hace que una parte del calórico que poseen salga de ellas—. En el proceso de perforación de cañones con un taladro, los cilindros de metal se montaban horizontalmente frente a una broca o barrena que no rotaba. Era el cilindro de metal el que se ponía en rotación (literalmente mediante la potencia de unos caballos), y la broca iba avanzando por el interior del cañón a medida que se realizada la perforación. Cuan-

do Rumford observó este proceso, le llamaron la atención dos hechos. En primer lugar, la enorme cantidad de calor que se generaba y, en segundo lugar, que la fuente de aquel calor parecía inagotable. El calor no cesaba de generarse durante todo el tiempo que los caballos estuvieran trabajando y el taladro se mantuviera en contacto con el metal del cañón. Si el modelo calórico era correcto, entonces seguramente en algún punto todo el calórico habría salido del cilindro en rotación y no habría quedado nada para calentarlo.

Rumford estableció una analogía con una esponja empapada en agua y colgada de un hilo en medio de una habitación. Esta esponja iría pasando gradualmente su humedad al aire y finalmente quedaría seca y sin humedad. Este proceso sería equivalente al modelo calórico. Pero el calor era más parecido al tañido de una campana de iglesia. El sonido producido por una campana no se «agota» una vez que se ha golpeado la campana, y mientras se está golpeando continuará produciendo su sonido característico. De una forma sencilla, utilizando un suplemento de metal como extensión del tubo del cañón con la intención de que fuera cortado antes de horadar, Rumford se puso a medir cuánto calor se producía utilizando en el taladro una broca sin relieve para que el experimento resultara más impresionante. Introduciendo el cilindro de metal en una caja de madera llena de agua, pudo medir el calor que se liberaba, cronometrando el tiempo que tardaba el agua en llegar a la ebullición, y se divirtió viendo el asombro que manifestaban los espectadores al ver cómo grandes cantidades de agua fría llegaban rápidamente a hervir sin utilizar fuego alguno para ello. Sin embargo, como indicó también Rumford, éste no era un procedimiento eficiente para calentar el agua. Sus caballos tenían que ser alimentados y, si realmente se pretendía que el agua llegara a hervir, un método más eficiente para conseguirlo sería prescindir de los caballos y quemar el heno directamente

bajo el recipiente que contenía el agua. Con esta observación tan evidente, estaba a punto de comprender cómo la energía se conserva, aunque pueda pasar de una forma a otra.

Repitiendo el experimento una y otra vez (vaciando el agua caliente y sustituyéndola por agua fría), Rumford descubrió que siempre se tardaba el mismo tiempo en hervir la misma cantidad de agua utilizando el calor generado por la fricción. No había en absoluto indicio alguno de que el «calórico» se agotara como el agua de la esponja. Hablando de manera rigurosa, estos experimentos no constituyen una demostración irrefutable de que de este modo se pueda generar una provisión inagotable de calor, ya que no se puede reiterar eternamente el proceso —pero eran unos experimentos muy sugerentes y en aquella época se consideró que daban un golpe importante al modelo calórico —. También llevó a cabo una serie de experimentos en los que pesaba unas botellas selladas que contenían diversos fluidos a diferentes temperaturas, para determinar que no existía relación alguna entre la «cantidad de calor» de un cuerpo y su masa, por lo que no había nada material que fluyera hacia adentro o hacia afuera cuando el cuerpo se enfriaba o se calentaba. Rumford en ningún momento afirmó que supiera qué es el calor, aunque sí dijo haber demostrado qué no es el calor. Escribió lo siguiente:

> Me parece extremadamente difícil, si no imposible, hacerme una idea clara de alguna cosa que pueda ser provocada y transmitida del modo en que el Calor es provocado y transmitido en estos experimentos, salvo que esa cosa sea el MOVIMIENTO.[13]

Esta frase encaja exactamente con el concepto moderno de asociación entre el calor y el movimiento de cada uno de los átomos y las moléculas que hay en una sustancia; sin embargo, por supuesto, Rumford no tenía ni idea de cuál podía ser el tipo de movimiento asociado al calor, por lo que su afirmación no es en realidad tan presciente como parece. En cambio, la evi-

dencia que surgía de experimentos como éste fue lo que contribuyó a desarrollar el concepto de átomo en el siglo XIX. Además, una de las razones por las que la ciencia avanzó tan rápidamente en el siglo XIX fue que, a finales de la década de 1790, resultaba obvio para todos —excepto para algunos de la vieja escuela que llevaban todavía puestas las anteojeras— que la teorías del flogisto y del calórico estaban ya muertas y enterradas.

JAMES HUTTON: LA TEORÍA DEL ACTUALISMO EN LA GEOLOGÍA

Sin embargo, en cuanto a conocer el lugar del género humano en el espacio y el tiempo, el avance más significativo durante las últimas décadas del siglo XVIII fue el conocimiento cada vez más amplio de los procesos geológicos que han configurado la Tierra. La primera versión de esta historia fue formulada en su mayor parte por un hombre, el escocés James Hutton, y las líneas generales esbozadas por él fueron desarrolladas posteriormente, en el siglo XIX, por Charles Lyell. Hutton nació en Edimburgo el 3 de junio de 1726. Su padre fue William Hutton, un comerciante que ostentó el cargo de tesorero de la ciudad de Edimburgo y era también propietario de una modesta granja en Berwickshire. Murió cuando James era aún muy joven, por lo que el muchacho fue criado exclusivamente por su madre. James asistió a la escuela de secundaria en Edimburgo y realizó cursos de humanidades en la universidad de la misma ciudad, antes de entrar como aprendiz con un abogado a la edad de 17 años. Pero, por una parte, demostró no tener aptitudes para el derecho y, por otra parte, se interesó tan profundamente por la química que, al cabo de un año, ya estaba de vuelta en la universidad estudiando medicina (la disciplina que entonces era más accesible para poder acercarse a la química, como lo ponían de manifiesto los trabajos de personas como Joseph Black). Después de pasar tres años más en Edimburgo,

Hutton se trasladó a París y luego a Leiden, donde obtuvo su doctorado en medicina en septiembre de 1749. Sin embargo, nunca ejerció la medicina, y probablemente nunca tuvo intención de ejercerla, ya que hizo estos estudios tan sólo como un medio para estudiar química.

La herencia de Hutton incluía, entre otras cosas, la granja de Berwickshire, por lo que a su regreso a Gran Bretaña decidió que debía aprender las modernas técnicas agropecuarias. En consecuencia, a principios de la década de 1750 acudió primero a Norfolk y luego a los Países Bajos para ponerse al día, antes de ir a Escocia, donde puso en práctica las técnicas que había aprendido con el fin de convertir una granja poco atractiva y sembrada de rocas en una eficiente unidad de producción. Todas estas actividades al aire libre habían suscitado en James Hutton un cierto interés por la geología, al mismo tiempo que se mantenía su interés por la química. La química se convirtió en una buena baza cuando una técnica que Hutton había inventado años atrás en colaboración con su amigo John Davie fue desarrollada por éste para dar lugar a un eficaz proceso industrial para fabricar, a partir del hollín ordinario, un producto químico importante, la sal amoníaca o cloruro de amonio, que se utilizaba, entre otras aplicaciones, para preparar el algodón antes de proceder a su teñido o estampado. Con el dinero que recibió como participación en los beneficios obtenidos a partir del proceso de fabricación de sal amoníaca, en 1768, a los 42 años de edad, Hutton, que nunca se casó, alquiló su granja y se trasladó a Edimburgo para dedicarse a la ciencia. Tenía una amistad personal con Joseph Black, que era sólo dos años más joven que Hutton, y fue miembro fundador de la Royal Society de Edimburgo, que se constituyó en 1783. Pero, la causa principal de que sea recordado es su sugerencia de que la Tierra existe desde hace mucho más tiempo que el que calculaban los teólogos —y quizá desde siempre.

A partir de su estudio del mundo visible, Hutton llegó a la conclusión de que no habían sido necesarias grandes catástrofes (como el diluvio universal) para explicar el aspecto actual del globo terráqueo, y que, si se tuviera el tiempo suficiente para ello, todo lo que vemos se podría explicar en relación con los mismos procesos que observamos alrededor de nosotros actualmente: las montañas desgastadas por la erosión, y los sedimentos depositándose en el fondo del mar, antes de ser levantados para formar nuevas montañas como consecuencia de unos terremotos y una actividad volcánica similares a los que vemos hoy en día, y no por efecto de enormes terremotos que levantasen nuevas cordilleras de la noche a la mañana. Esta teoría se conoce como principio de actualismo o uniformitarianismo —en todas las épocas tiene lugar los mismos procesos uniformes y modelan continuamente la superficie de la Tierra—. La idea de que para explicar las características que se observan en la Tierra es necesario hablar de grandes hechos violentos ocasionales se conoce como catastrofismo.[14] Las teorías de Hutton hacían caso omiso de los conocimientos geológicos oficiales de su época, que eran una combinación de catastrofismo y neptunismo, es decir, la teoría según la cual la Tierra habría estado en otros tiempos totalmente cubierta por las aguas y que defendía en particular el geólogo prusiano Abraham Werner (1749-1817). Hutton organizó su argumentación cuidadosamente y presentó una defensa impresionante del actualismo en dos informes que se leyeron ante la Royal Society de Edimburgo en 1785 y se publicaron en 1788 en las *Transactions* de aquella sociedad: el primer informe fue presentado por Black en la asamblea general de la Royal Society celebrada en marzo de 1785; el propio Hutton leyó el segundo informe en mayo, unas pocas semanas antes de cumplir los 59 años de edad.

Las propuestas de Hutton provocaron unas fuertes (pero equivocadas) críticas por parte de los neptunistas a principios

de la década de 1790 y, en respuesta a estas críticas, Hutton, aunque tenía ya más de 60 años y no se encontraba bien de salud, desarrolló sus argumentos en un libro, *Theory of the Earth (Teoría de la Tierra),* publicado en dos volúmenes en 1795. Estaba trabajando todavía en la redacción de un tercer volumen cuando le sobrevino la muerte, el 26 de marzo de 1797, a los 71 años de edad. Por desgracia, aunque Hutton presentó una defensa cuidadosamente argumentada y apoyada por gran cantidad de hechos observados, su estilo como escritor era en gran medida impenetrable, aunque el libro contenía unos cuantos ejemplos impactantes. Uno de los mejores ejemplos es el relativo a las vías romanas aún visibles en Europa unos 2000 años después de haber sido trazadas, a pesar de los procesos naturales de erosión que se han producido durante todo este tiempo. Hutton señaló que lógicamente el tiempo requerido para que los procesos naturales esculpieran la faz de la Tierra hasta darle su aspecto moderno tuvieron que durar muchísimo más tiempo —ciertamente mucho más que los 6000 años que más o menos autorizaba la interpretación de la Biblia que se aceptaba de forma generalizada por aquel entonces—. Hutton consideró que la edad de la Tierra estaba más allá de los cálculos posibles y en su estilo más contundente escribió «no encontramos vestigios de un comienzo —ni perspectivas de un final».

Sin embargo, tales ráfagas de lucidez eran raras en aquel libro y, al morir Hutton y no estar ya presente para defender sus teorías, que sufrieron nuevos ataques feroces por parte de los neptunistas y los wernerianos, dichas teorías hubieran languidecido, de no ser por su amigo John Playfair (1748-1819), que entonces era catedrático de matemáticas, y luego lo fue de filosofía natural, en la Universidad de Edimburgo. Recogiendo el testigo, Playfair escribió un resumen magistral y claro de los trabajos de Hutton, que se publicó en 1802 con el título *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*. Gracias a este libro, el

principio del actualismo llegó por primera vez a una gran audiencia, y a todos aquellos que tenían el ingenio necesario para ver lo evidente les convenció de que allí había una teoría que se debía tomar en serio. Sin embargo, tuvo que pasar toda una generación para que la semilla puesta por Hutton y Playfair floreciera, ya que la persona que tomó de Playfair el testigo del actualismo nació ocho meses después de la muerte de Hutton.

Cuarta Parte

LA VISIÓN A GRAN ESCALA

Capítulo 9

LA «REVOLUCIÓN DARWINIANA»

En el siglo se produjeron muchos avances espectaculares en el mundo de la ciencia, pero indudablemente el más importante en cuanto a llegar al conocimiento del lugar que ocupa la humanidad en el universo (y se puede decir que el concepto más importante de toda la ciencia en su globalidad) fue la teoría de la selección natural, que, por primera vez, ofrecía una explicación científica del fenómeno de la evolución. El nombre de Charles Darwin está ligado para siempre a la idea de selección natural, y con razón; pero hay otros dos nombres, Charles Lyell y Alfred Russel Wallace, que merecen estar a su lado en el centro de esta fase de estudio de la evolución.

CHARLES LYELL: SU VIDA

Charles Lyell procedía de una familia muy bien situada, pero cuya riqueza se remontaba a escasamente dos generaciones. Se originó con su abuelo, llamado también Charles Lyell, que había nacido en Forfarshire, Escocia, en 1734. Este Charles Lyell era hijo de un granjero, pero después de la muerte de su padre entró como aprendiz de contable, antes de enrolarse en la armada real en 1756 como marinero de primera. La formación que había adquirido con anterioridad le ayudó a convertirse sucesivamente en secretario del capitán, ayudante de artillería y luego guardiamarina, que era el primer paso para llegar a ser

oficial. Pero no estaba destinado a convertirse en otro Nelson y, en 1766, llegó a ser contador en un navío de Su Majestad llamado el *Romney*. Los admiradores de Horatio Hornblower y los aficionados a las novelas de Patrick O'Brien se darán cuenta de que el trabajo de contador daba, incluso a un hombre honesto, buenas oportunidades de llenarse los bolsillos —el contador era el responsable de comprar suministros para el barco, vendiéndoselos luego a la armada con beneficios—; el abuelo Lyell fue incluso más lejos que la mayoría de los contadores, ya que se unió a una sociedad comercial para abastecer a los barcos de la armada en los puertos de Norteamérica. En 1767 contrajo matrimonio con Mary Beale, una muchacha de Cornualles, que en 1769 dio a luz en Londres a otro Charles Lyell, que sería más tarde el padre del geólogo. En 1778, el abuelo Charles Lyell era secretario del almirante John Byron y contador de su buque insignia, el *Princess Royal*. Como resultado de la acción que la flota de Byron llevó a cabo contra los franceses durante la guerra americana de Independencia (la ayuda de la armada francesa a la causa rebelde contribuyó a que los ingleses perdieran aquella guerra), Lyell recibió una recompensa en metálico tan elevada[1] que, añadiéndola al resto de los ingresos que percibía, en 1782, tres años después de retirarse de la armada, pudo comprar en Escocia unas fincas cuya extensión llegaba a 5000 acres e incluían una elegante mansión en Kinnordy, Forfarshire (actualmente Angus). Su hijo había sido educado en consonancia con el nivel social cada vez más alto del viejo Lyell y asistió durante más de un año a la Universidad de St. Andrews, antes de trasladarse a Peterhouse, Cambridge, en 1787.

El segundo Charles Lyell recibió una buena educación (se graduó en 1791 y luego estudió leyes en Londres) y pudo viajar a placer, realizando en 1792 un amplio recorrido por Europa, durante el cual visitó París justo cuando Francia estaba metida de lleno en la convulsión que supuso la Revolución Francesa.

En 1794 se convirtió en miembro de la Peterhouse, lo cual le proporcionó relaciones muy útiles para un aspirante a abogado, pero continuó residiendo en Londres hasta que su padre falleció en enero de 1796, a los sesenta y dos años de edad. Más tarde, aquel mismo año, el segundo Charles Lyell se casó con miss Frances Smith y, dado que no tenía necesidad de ejercer como abogado, se trasladó a Kinnordy, donde el geólogo Charles Lyell nació el 14 de noviembre de 1797.

Sin embargo, Charles y Francés Lyell nunca llegaron a establecerse definitivamente en Escocia: antes de que su niño cumpliera un año, se trasladaron al sur de Inglaterra,[2] alquilando una gran casa y algo de terreno en New Forest, no lejos de Southampton. Fue allí donde creció el joven Charles, rodeado por sus hermanos menores, que finalmente llegaron a ser dos hermanos varones y nada menos que siete hermanas. New Forest era un escenario adecuado para que el muchacho desarrollara su interés por la botánica y los insectos, cosa que hizo mientras asistía a la escuela local, pero en 1810 se trasladó, junto con su hermano Tom, a una pequeña escuela secundaria situada en Midhurst. Tom se marchó en 1813 para hacerse guardiamarina, pero Charles, siendo el hermano mayor, tenía que recibir una formación que le permitiera seguir los pasos de su padre.

Después de visitar Escocia en 1815 con sus padres y su hermana Fanny (haciendo un amplio recorrido, pero pasando por las propiedades familiares que algún día heredaría), Charles fue a Oxford en febrero de 1817 donde entró en el Exeter College como caballero sin beca, el «rango» más prestigioso (y más caro) entre los que se preparaban para una licenciatura. Llegó con fama de ser un estudiante excelente en las materias tradicionales orientadas hacia las humanidades, y llegaba a una universidad que estaba entonces comenzando a quitarse de encima una reputación bien merecida de ser una institución adecuada únicamente para la educación de párrocos rurales.[3] Lyell descu-

brió en sí mismo una insospechada habilidad para las matemáticas y se interesó por la geología después de leer un libro que encontró en la biblioteca de su padre, la *Introduction to Geology*, de Robert Bakewell, a finales de 1816 o principios de 1817. Bakewell era un defensor de las teorías de Hutton, por lo que la lectura del libro fue para Lyell un modo de conocer la obra de éste; a continuación leyó el libro de Playfair. Fue la primera vez que tuvo noción de que existía una disciplina llamada geología. Posteriormente asistió a algunas conferencias sobre mineralogía impartidas por William Buckland (1784-1856) en Oxford, durante el trimestre de verano de 1817. Buckland a su vez se había inspirado en la obra pionera de William Smith (1769-1839), un inspector al cual sus trabajos sobre canales a finales del siglo XVIII y principios del XIX le habían hecho familiarizarse con los estratos de rocas existentes en Inglaterra. Además, Smith era un experto en el uso de los fósiles para determinar las edades relativas de los distintos estratos (es decir, para establecer cuáles eran más antiguos y cuáles más nuevos), aunque en aquella época no había modo de averiguar sus edades en cifras absolutas. William Smith, que actualmente está considerado como el «padre de la geología inglesa», fue quien realizó el primer mapa geológico de Inglaterra, que se publicó en 1815, aunque gran parte de sus materiales ya habían sido enviados a otros colegas suyos como Buckland. El propio Buckland había participado en una larga expedición por Europa en 1816, por lo que seguramente tendría noticias interesantes y de primera mano, que transmitiría luego a sus alumnos, de forma parecida a lo que hoy en día puede suceder cuando un profesor universitario ha regresado recientemente de un viaje al extranjero durante el cual ha visitado alguno de los grandes telescopios para llevar a cabo observaciones del universo.

El creciente interés de Lyell por la geología no era totalmente del agrado de su padre, que temía que pudiera distraerle de

sus estudios de lenguas clásicas. Sin embargo, además de asistir a las clases magistrales de Buckland, Lyell estaba ya empapándose de geología en sus viajes por Gran Bretaña (incluidas visitas posteriores a Escocia y East Anglia), durante los cuales no se limitaba a admirar los bellos paisajes. Durante el verano de 1818, Charles Lyell padre llevó a la familia, incluido Charles Lyell hijo, a realizar un amplio recorrido por Europa. El joven Charles tuvo ocasión de visitar el Jardín des Plantes (como se llamaba entonces a lo que había sido el Jardín du Roi) en París, pudo ver algunos de los especímenes de Cuvier y también leer en la biblioteca las obras de Cuvier sobre fósiles (Cuvier estaba precisamente en Inglaterra en aquella época). El recorrido incluía Suiza y el norte de Italia, lo cual le dio al joven una excelente oportunidad para conocer muchas maravillas geológicas, así como las excelencias culturales de ciudades como Florencia y Bolonia. En 1819, Lyell se licenció en Oxford a los 21 años de edad y fue también elegido miembro de la Geological Society de Londres (lo cual no era realmente un gran honor, ya que en aquella época cualquier caballero que tuviera afición por la geología podía convertirse en miembro, pero sí indica por dónde iban sus intereses). El paso siguiente para seguir las huellas de su padre debería haber sido estudiar leyes, pero, cuando Charles estaba estudiando de forma intensiva para sus exámenes finales, empezó a manifestarse el problema que le haría cambiar de planes: le sobrevinieron problemas de visión y comenzó a sufrir fuertes dolores de cabeza.

Después de otro viaje recorriendo Inglaterra y Escocia (en parte acompañado por su padre y por sus hermanas Marianne y Caroline), Lyell reanudó sus estudios de leyes en Londres en febrero de 1820, pero inmediatamente reaparecieron los problemas oculares, con lo que se le planteó la duda sobre si sería capaz de hacer carrera en una profesión que requería examinar atentamente y con todo detalle documentos manuscritos (re-

cordemos que en aquella época no había luz eléctrica). Con el fin de dar a los ojos de su hijo una oportunidad para que se recuperasen, Charles Lyell padre se llevó al muchacho a Roma, pasando por Bélgica, Alemania y Austria. Estuvieron fuera desde agosto hasta noviembre y, durante un tiempo, parecía que el descanso había dado buen resultado. Lyell volvió a sus estudios de leyes, pero continuó sufriendo problemas en los ojos, y en el otoño de 1821 hizo una larga visita al hogar familiar, Bartley, en New Forest. En octubre de aquel año emprendió un pausado viaje por los South Downs, visitando su antigua escuela en Midhurst y llegando hasta Lewes, Sussex, donde conoció a Gideon Mantell (1790-1852). Mantell era cirujano y, además, un geólogo aficionado, pero muy bueno, que descubrió varios tipos de dinosaurio. Lyell regresó a Londres y a sus estudios de derecho desde finales de octubre hasta mediados de diciembre de 1821, pero la combinación de sus problemas de visión con el amor a la geología tuvo como resultado que, sin romper formalmente con la carrera que había elegido, en 1822 renunció prácticamente a ser abogado y comenzó seriamente a realizar investigaciones geológicas en el sudeste de Inglaterra, estimulado por las conversaciones y la correspondencia con su nuevo amigo Mantell.

Gracias a los trabajos de personas como William Smith, se estaba llegando ya a conocer bastante bien en aquella época la estructura geológica de Inglaterra y Gales (al mismo tiempo que se estaban trazando los mapas de las características geológicas extendiéndolas hasta Francia) y era obvio que los estratos de rocas, después de quedar depositados o instalados, se habían retorcido e inclinado por el efecto de fuerzas de enorme calibre. Era natural suponer que estas fuerzas, y las que habían levantado por encima del nivel del mar lo que antes había sido claramente fondos marinos, estaban asociadas con los terremotos. Pero a pesar de las teorías de Hutton, la opinión amplia-

mente aceptada, defendida por geólogos como William Conybeare (1787-1857), era que los cambios se habían producido a causa de convulsiones violentas y de corta duración, y que el tipo de procesos que se veía actuar entonces sobre la superficie de la Tierra eran insuficientes para producir tales cambios. A principios de la década de 1820, Lyell se planteaba dudas con respecto a estos argumentos, aunque seguía estando más impresionado por las teorías de Hutton, y en los escritos de Conybeare aprendió mucho sobre los últimos avances de la geología.

En realidad, Lyell llegó en sus estudios de derecho hasta el nivel suficiente para ser admitido en el ejercicio de la abogacía en mayo de 1822 y posteriormente defendió algunas causas como abogado ante los tribunales (durante poco tiempo y de manera más bien discontinua). Pero en 1823, no sólo visitó París una vez más (esta vez reuniéndose con Cuvier, que seguía siendo un auténtico partidario de las teorías catastrofistas) sino que se implicó en la gestión de la Geological Society, primero como secretario y luego como encargado de asuntos internacionales; mucho más tarde, ejerció también como presidente en dos períodos distintos. El viaje que hizo en 1823 no sólo tuvo importancia en el aspecto científico (asistió a varias conferencias en el Jardín des Plantes y tuvo encuentro con científicos franceses), sino que también fue significativo desde un punto de vista histórico, ya que era la primera vez que Lyell cruzaba el canal de la Mancha en un barco de vapor, el paquebote *East of Liverpool*, que le llevó directamente desde Londres hasta Calais en sólo once horas, sin necesidad de esperar a que el viento fuera favorable. Ciertamente, fue un pequeño paso tecnológico, pero también uno de los primeros indicios de que las comunicaciones globales se aceleraban y algo que iba a cambiar el mundo.

El mundo de Lyell empezó también a cambiar en 1825, el año en que comenzó a actuar como abogado ante los tribuna-

les. Le pidieron que escribiera para la Quarterly Review, una revista publicada por John Murray, y colaboró con ensayos, críticas de libros sobre temas científicos (que en sí mismas eran realmente una excusa para escribir un ensayo) y artículos como, por ejemplo, la propuesta de que se fundara una nueva universidad en Londres. Se vio que tenía talento para escribir y, lo que era todavía mejor, la *Quarterly Review* le pagaba por sus colaboraciones. El trabajo que Lyell realizó como abogado le aportó muy pocos ingresos (no está claro si ganaba realmente lo suficiente para cubrir los gastos derivados de su actividad), pero su trabajo como escritor le permitió, por primera vez, conseguir un cierto grado de independencia económica con respecto a su padre —no es que su padre le presionara en absoluto, pero aún así fue un paso decisivo en la vida del joven—. La *Quarterly Review* también hizo que el nombre de Lyell llamara la atención de un amplio círculo de personas cultivadas, lo cual le abrió otras perspectivas. Tras haber descubierto su propio talento como escritor, a principios de 1827 Lyell decidió escribir un libro sobre geología y comenzó a reunir material para este proyecto. Por lo tanto la idea de hacer ese libro ya existía y Lyell había demostrado ya sus aptitudes como escritor antes de emprender, en 1828, su expedición geológica más importante y más famosa.

Los viajes de Lyell por Europa y su estudio de la geología

Esta expedición recuerda a la gran expedición botánica llevada a cabo por John Ray en el siglo anterior y demuestra lo poco que habían cambiado las cosas a pesar de la aparición de los barcos a vapor. En mayo de 1828, Lyell viajó primero a París, donde había quedado en reunirse con el geólogo Roderick Murchison (1792-1871), y luego viajaron los dos juntos hacia el sur atravesando Auvernia y siguiendo la costa mediterránea

hasta el norte de Italia, mientras Lyell no dejaba de hacer anotaciones minuciosas sobre las características geológicas de todo lo que iban encontrando. Murchison, que viajaba acompañado por su esposa, emprendió el regreso a Inglaterra desde Padua a finales de septiembre, mientras Lyell continuaba el viaje apresuradamente hacia Sicilia, el lugar más próximo al continente europeo donde se podía encontrar actividad volcánica y sísmica. Fue precisamente aquello que vio en Sicilia lo que convenció a Lyell de que la Tierra se había configurado a través de los mismo procesos que están en marcha actualmente, unos procesos que han estado actuando durante períodos de tiempo inmensamente largos. El trabajo de campo de Lyell fue lo que dio consistencia a la teoría esbozada por Hutton. En el Etna encontró, entre otras cosas, fondos marinos que habían ascendido «700 pies[*] y más» sobre el nivel del mar, separados por flujos de lava, y en un lugar determinado le surgió:

> Un ejemplo muy claro de la longitud de los intervalos que ocasionalmente separaban los flujos de distintas corrientes de lava. Se puede ver allí un estrato de ostras [fosilizadas], perfectamente identificables con la especie común comestible que conocemos, de no menos de veinte pies de espesor [unos 6 metros], situada sobre una corriente de lava basáltica; sobre el estrato de ostras aparece superpuesta una segunda masa de lava, junto con toba o peperino.
>
> … no podemos evitar sorprendemos al calcular la antigüedad de esta montaña [el Etna], si tenemos en cuenta que su base tiene unas noventa millas de circunferencia; en consecuencia serían necesarios noventa flujos de lava, con una anchura de una milla cada uno de ellos en el lugar en que terminan, para levantar el pie actual del volcán hasta la altura media de una corriente de lava.[4]

Fue esta forma tan clara de escribir, así como el peso de las pruebas que reunió para apoyar su teoría, lo que hizo que el libro de Lyell fuera una auténtica sorpresa, tanto para los geólogos como para los lectores cultos. Lyell también observó que, puesto que el Etna (y, en realidad, toda Sicilia) era relativamente joven, las plantas y los animales hallados allí tenían que ser especies que habían emigrado de África o de Europa y que luego se habían adaptado a las condiciones de la isla. Dado que la

vida se había ido adaptando a las cambiantes situaciones medioambientales de nuestro planeta, se podía deducir que la vida debió de ser modelada en cierto modo por las fuerzas geológicas, aunque Lyell no podía decir exactamente cómo había sucedido esto.

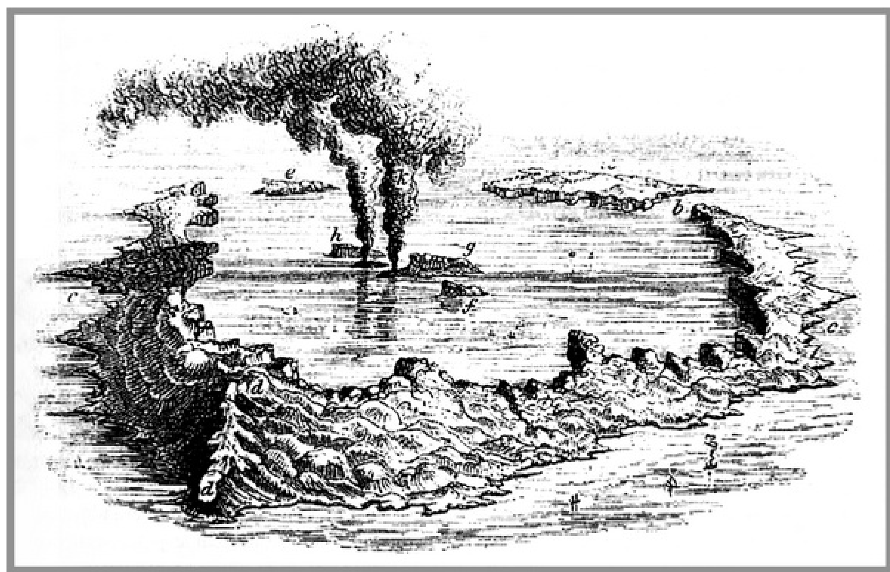
Lyell publica su obra «Principles of Geology»

En febrero de 1829, Lyell estaba de vuelta en Londres y, dado que su vista estaba mejor que nunca después de aquel largo viaje que le había apartado de los documentos legales y le había permitido disfrutar de mucha actividad física, se dispuso sin pérdida de tiempo a trabajar en su libro. Lyell no se centró exclusivamente en sus propios estudios de campo, sino que también incluyó los trabajos de geólogos de todo el continente europeo, produciendo así lo que, con mucho, era el compendio más minucioso que se había escrito hasta el momento. John Murray, el editor de la *Quarterly Review*, fue obviamente el elegido para presentar este material al público y, aunque Lyell continuó reescribiendo su obra incluso después de haberla enviado a la imprenta, el primer volumen de los *Principles of Geology (Principios de geología)* (un título elegido deliberadamente para recordar los Principia de Newton) apareció en julio de 1830 y se convirtió en un éxito inmediatamente.[5]

Aunque Lyell discutiera a menudo con Murray sobre cuestiones económicas, el editor en realidad trató bien a su autor, teniendo en cuenta lo que se estilaba en la época, y fueron los ingresos que Lyell obtuvo a partir de este libro los que finalmente le convirtieron en una persona económicamente independiente, aunque su padre continuaba pasándole una asignación. Después de que Lyell hubiera llevado a cabo más trabajos de campo (esta vez principalmente en España), apareció el segundo volumen de los *Principles of Geology* en enero de 1832 y,

no sólo fue un éxito en sí mismo, sino que reanimó las ventas del primer volumen.

La demora entre la publicación de los dos volúmenes no se debió exclusivamente al trabajo de campo. En 1831, se fundó una cátedra de geología en el King's College de Londres y Lyell solicitó el nombramiento y tuvo la buena fortuna de conseguirlo, a pesar de la oposición de algunos representantes de la Iglesia a los que preocupaban sus ideas sobre la edad de la Tierra. Desde dicha cátedra impartió una serie de clases magistrales que tuvieron gran éxito (una innovación atrevida fue que se permitió la asistencia de mujeres a algunas de ellas), pero en 1833 dimitió para dedicarse a escribir, una actividad que consideraba más rentable y en la que era su propio jefe, sin tener que atender a obligaciones que le hicieran perder el tiempo. Fue la primera persona que se ganó la vida escribiendo sobre temas científicos, aunque hay que reconocer que recibía alguna pequeña ayuda procedente del patrimonio familiar.



28. Dibujo de Santorini incluido en los *Principles of Geology, Volume 2,* de Lyell, 1868.

Hubo otras cuestiones que también le distrajeron. En 1831, se comprometió con Mary Homer, hija del geólogo Leonard Homer (1786-1864). Esta joven compartía su interés por la geología, por lo que se estableció entre ella y Charles una estrecha y feliz relación. La pareja contrajo matrimonio en 1832, cuando la asignación que Lyell recibía de su padre pasó de 400 a 500 libras esterlinas anuales, mientras que Mary aportó sus inversiones, que rentaban 120 libras anuales. Todo esto, sumado a los ingresos cada vez más altos que obtenía Lyell por sus escritos, junto con el hecho de que nunca tuvieron hijos, hizo que la pareja viviera con una situación económica cómoda y que la cátedra del King's College no fuera una fuente de ingresos importante, sino más bien una distracción fastidiosa. Además, estaba la política. A finales de 1830, terminó medio siglo de gobierno *tory* en Gran Bretaña y tomó el poder un gobierno *whig* que se había comprometido a reformar el Parlamento. Eran tiempos turbulentos en toda Europa. Anteriormente, en 1830, los trabajadores agrícolas de Inglaterra se rebelaron protestando por la pérdida de puestos de trabajo que había causado la implantación de la nueva maquinaria en las granjas. Se percibía claramente un soplo de aire revolucionario y los recuerdos de la Revolución Francesa estaban todavía frescos. Las reformas propuestas por los *whigs*, que al principio fueron bien acogidas en la mayoría de las zonas rurales, incluían la abolición de los distritos corrompidos, donde unos pocos votantes bastaban para elegir a un miembro parlamentario de la Cámara de los Comunes. Sin embargo, las leyes que eran necesarias para esta abolición quedaron bloqueadas en la Cámara de los Lores. A pesar de la corrupción existente en los distritos, entonces, lo mismo que ahora, las elecciones parciales se consideraban importantes también como indicadores de la voluntad del pueblo y, en septiembre de 1831, cuando Charles Lyell estaba en Kinnordy de vacaciones, unas elecciones parciales de crucial

importancia tuvieron lugar en Forfarshire. En toda la circunscripción no llegaban a noventa votantes, todos terratenientes, incluidos Charles Lyell padre y su hijo, y la votación no era secreta. Después de contar los votos, todo el mundo sabía lo que había votado cada uno. Charles Lyell padre votaba por el candidato *tory*, que ganó por un estrecho margen, mientras que «nuestro» Charles Lyell se abstuvo. Estas elecciones fueron un factor clave para retrasar la reforma del Parlamento, y también tuvieron un efecto adverso en las perspectivas de ascenso de Tom Lyell, lugarteniente de la armada, que dependía del patrocinio de los *whigs* para ascender, ya que el Ministerio de Marina estaba dirigido por personas a las que había nombrado el gobierno *whig*, y quedó marcado como el hijo de un hombre que había votado a los conservadores en un momento crucial.

Las teorías de Lyell sobre las especies

Fue en el segundo volumen de los *Principles of Geology* donde Lyell abordó el complicado rompecabezas de las especies, llegando a la siguiente conclusión:

> Cada especie puede haber tenido su origen en una única pareja, o en un solo individuo, en los casos en que un individuo fuera suficiente, y las especies pueden haber sido creadas sucesivamente en momentos y lugares que les permitieran multiplicarse y perdurar durante un período determinado y ocupar un lugar determinado en el globo terráqueo.

Según la opinión de Lyell en aquella época, se trataría de la obra de un Dios que «intervino con sus propias manos» y de algo no muy diferente de la historia del Arca de Noé. Obsérvese que esta hipótesis incluye explícitamente la idea —obvia a partir del registro fósil que existía ya en la década de 1830— de que muchas especies que vivieron alguna vez en la Tierra se han extinguido y han sido sustituidas por otras especies. Sin embargo, de acuerdo con el espíritu de su época, Lyell reservó

un lugar especial para los seres humanos, considerando que nuestra especie es única y distinta del reino animal. No obstante, lo que sí hizo fue sugerir que la razón por la que se habían extinguido algunas especies habría sido la competencia con otras por determinados recursos, tales como los alimentos.

El tercer volumen de los *Principles of Geology* apareció en abril de 1833. Los trabajos realizados por Lyell durante el resto de su vida se centraron en mantener al día este compacto libro, reescribiendo y publicando nuevas ediciones en rápida sucesión —la duodécima y última edición apareció de forma póstuma en 1875, después de que Lyell falleciera en Londres el 22 de febrero de aquel año (menos de dos años después de la muerte de su esposa) mientras estaba trabajando en lo que sería su última revisión del libro—. Su libro *Elements of Geology* (*Elementos de geología*), que apareció en 1838 y está considerado como el primer texto moderno de geología, estaba basado en los *Principles of Geology*, y también fue revisado unas cuantas veces. Este ansia por revisar no se debía realmente a que la geología fuera una disciplina que estuviera evolucionando rápidamente en aquellos tiempos;[6] la obsesión de Lyell por mantener el libro totalmente actualizado deriva del hecho de que era su principal fuente de ingresos (al menos hasta que su padre falleció, en 1849, el año de la fiebre del oro en California), tanto por las ventas en sí mismas, como porque le ayudó a mantener su perfil de escritor científico y de geólogo más destacado de su tiempo, por aclamación general. Lyell fue nombrado caballero en 1848 y se convirtió en baronet (una especie de caballero con título hereditario) en 1864. Aunque después de 1833 no dejó en modo alguno de ser un activo geólogo de campo, tenía ya 36 años y su tarea importante en la ciencia la hizo sobre todo con sus libros, los *Principles of Geology* y los *Elements of Geology*; no hay mucho que decir sobre lo que fue su vida en años posteriores, salvo en el contexto de su relación con Charles Darwin, co-

mo veremos más adelante. Pero, vale la pena mencionar uno de los viajes geológicos que hizo Lyell posteriormente, ya que muestra cómo estaba cambiando el mundo en el siglo XIX. En el verano de 1841, realizó una visita de un año de duración a Norteamérica (viajando en barco de vapor, por supuesto), donde no sólo encontró nuevas pruebas geológicas para establecer la antigüedad de la Tierra y vio en funcionamiento las fuerzas de la naturaleza en lugares como las cataratas del Niágara, sino que además se quedó agradablemente sorprendido por la facilidad con que los nuevos ferrocarriles hacían posible viajar por lo que hasta poco tiempo atrás había sido territorio desconocido. También pronunció conferencias públicas que tuvieron una acogida enormemente favorable y promocionó la venta de sus libros en el Nuevo Mundo. Lyell disfrutó tanto con esta experiencia que regresó en tres ocasiones y, como consecuencia de haber adquirido un conocimiento de primera mano de Estados Unidos, se convirtió en un partidario declarado de la Unión durante la guerra civil americana, mientras que en Gran Bretaña la mayoría de las personas de su posición social apoyaban a los confederados. Sin embargo, cualquier cosa que Lyell hiciera en esta etapa posterior de su vida quedaba eclipsada por los *Principles*, pero también esta obra quedó luego eclipsada a los ojos de muchos por otro libro que, según reconoció su propio autor, tenía una enorme deuda con el de Lyell: el *Origen de las especies* de Charles Darwin. Darwin era el hombre adecuado, que se encontraba en el lugar adecuado y en el momento preciso para sacar el máximo provecho de los *Principles*. Pero como veremos a continuación, esto no fue sólo una cuestión de suerte, aunque a veces se pretende dar a entender que sí lo fue.

En la época en que Charles Darwin entró en escena, la idea de la evolución no era nada nuevo. Había ya ciertas teorías evolucionistas que se remontaban a los antiguos griegos; incluso dentro del intervalo de tiempo que cubre este libro, se produje-

ron elucubraciones notables sobre el modo en que cambian las especies, como es el caso de la teoría formulada por Francis Bacon en 1620 y, un poco más tarde, la del matemático Gottfried Wilhelm Leibniz; mientras que, en el siglo XVIII, Buffon, haciendo conjeturas sobre el hecho de que existieran especies similares, pero ligeramente diferentes, en distintos lugares del planeta, formuló la hipótesis de que el bisonte de Norteamérica podría descender de una forma ancestral del toro europeo, que, después de haber emigrado allí, «habría recibido la impronta del clima y se habría convertido con el tiempo en un bisonte». Lo que resultaba diferente en Charles Darwin (y Alfred Russel Wallace) era que desarrolló una sólida teoría científica para explicar por qué se producía la evolución, en vez de recurrir a vagas sugerencias, como la idea de que pudiera deberse a «la impronta del clima». Antes de Darwin y Wallace, la mejor teoría sobre el modo en que podría funcionar la evolución fue desarrollada por el abuelo de Charles Darwin, Erasmus, a finales del siglo XVIII, e independientemente por el francés Jean-Baptiste Lamarck a comienzos del siglo XIX. Aunque esta teoría haya sido ridiculizada a veces por los que tienen el don de la visión retrospectiva, hay que decir, sin embargo, que, dado el nivel de conocimiento existente en aquella época, se trataba de una buena idea.

Teorías sobre la evolución: Erasmus Darwin y la «Zoonomía»

La relación entre la familia Darwin y el misterio de la vida en la Tierra, se remonta en realidad a la generación anterior a Erasmus, es decir, a los tiempos de Isaac Newton. Robert Darwin, el padre de Erasmus, vivió desde 1682 hasta 1754 y fue un abogado que se retiró de su trabajo en los tribunales y se fue a vivir en la residencia familiar de Elston, en la región central

de Inglaterra, a los 42 años de edad. Aquel mismo año se casó y, el 12 de diciembre de 1731, nació Erasmus, el menor de siete hermanos. Sin embargo, varios años antes de instalarse en la dicha hogareña, en 1718, Robert había observado la existencia de un fósil inusual incrustado en un bloque de piedra que se encontraba en el pueblo de Elston. Actualmente se sabe que este hallazgo era parte de un plesiosauro del período jurásico; gracias a Robert Darwin, este fósil fue presentado a la Royal Society y, como agradecimiento, se invitó a Robert a asistir el 18 de diciembre de aquel año a una reunión de esta sociedad, donde conoció a Newton, que entonces era su presidente. Poco se sabe sobre la vida de Robert Darwin, pero está claro que sus hijos, tres chicas y cuatro varones, crecieron en una casa donde había una curiosidad mayor de lo habitual por la ciencia y el mundo natural.

Erasmus se educó en la Chesterfield School (donde uno de sus amigos fue lord George Cavendish, segundo hijo del duque de Devonshire) antes de trasladarse en 1750, al St. John's College de Cambridge, financiado en parte por una beca que le proporcionaba 16 libras esterlinas anuales. A pesar del horrible estado en que se encontraba la universidad en aquel entonces, a Erasmus le fue bien, especialmente en lenguas clásicas, y también logró un cierto renombre como poeta. Pero su padre no era un hombre rico y Erasmus tuvo que elegir una profesión con la que pudiera ganarse la vida. Después de su primer año en Cambridge, comenzó a estudiar medicina; también se hizo amigo de John Michell, que entonces era tutor en el Queen's College. Continuó sus estudios de medicina en Edimburgo en 1753 y 1754 (el año en que murió su padre), regresando después a Cambridge, donde obtuvo su licenciatura en medicina en 1755. Puede que después pasara más tiempo en Edimburgo, pero no hay datos de que recibiera allí su título de doctor, aunque esto no le impidió añadir estas siglas a su lista de títulos.

Independientemente de cuáles fueran sus títulos, Erasmus Darwin tuvo éxito en el ejercicio de la medicina y no tardó en abrir una próspera consulta en Lichfield, 24 kilómetros al norte de Birmingham. También comenzó a publicar informes científicos, interesándose especialmente por el vapor, la posibilidad de construir máquinas de vapor, y el modo en que se forman las nubes. El 30 de diciembre de 1757, unas pocas semanas después de su vigesimoséptimo cumpleaños, se casó con Mary Howard, conocida como Polly, que unas semanas más tarde cumpliría 18 años. Toda esta actividad, con varios frentes de actuación simultáneos, era típica de Erasmus Darwin, quien ciertamente vivió su vida al máximo. La pareja tuvo tres hijos que llegaron a la edad adulta (Charles, Erasmus y Robert) y dos que murieron en la infancia (Elizabeth y William). El único que se casó fue Robert (1766-1848), el padre de Charles Robert Darwin, el que se haría famoso por su teoría de la evolución. El Charles Darwin que fue el hijo mayor de Erasmus, y un estudiante brillante que era la niña de los ojos de su padre, parecía tener ante sí un porvenir deslumbrante como médico, pero, a los 20 años de edad, cuando era estudiante de medicina en Edimburgo, se cortó en un dedo mientras hacía una disección y contrajo una infección (septicemia) que le llevó a la muerte. Para entonces, en 1778, Erasmus hijo estaba ya en camino de convertirse en abogado, pero el joven Robert todavía iba a la escuela y era muy fuerte la presión de su padre para que llegara a ser médico, cosa que logró con éxito, a pesar de que carecía de la brillantez de su hermano y no soportaba la vista de la sangre. Erasmus hijo murió también relativamente joven, ahogado a la edad de 40 años, en un suceso que pudo ser un accidente o tal vez un suicidio.

La propia Polly ya había fallecido en 1770, después de una enfermedad larga y dolorosa. Aunque no hay duda de que Erasmus amó a su primera esposa y se quedó profundamente afec-

tado por su muerte, cuando Mary Parker, de 17 años de edad, se incorporó a la casa para cuidar del pequeño Robert, sucedió lo inevitable y la muchacha tuvo dos hijas cuyo padre fue Erasmus, quien las reconoció oficialmente como suyas y cuidó de ellas en su propia casa, incluso después de que su madre se marchara y se casara con otro hombre, porque allí todos quedaron como amigos. Erasmus Darwin se enamoró posteriormente de una señora casada, Elizabeth Pole, y consiguió obtener su mano después de la muerte del esposo; Erasmus y Elizabeth contrajeron matrimonio en 1781 y tuvieron siete hijos, de los cuales sólo uno murió en la infancia.

Con todo esto y teniendo que atender a su trabajo como médico, se podría pensar que a Erasmus Darwin le quedaba poco tiempo para la ciencia. Pero, había sido nombrado miembro de la Royal Society en 1761, fue además el motor de la fundación de la Lunar Society, y trataba con científicos como James Watt, Benjamín Franklin (al que conoció a través de John Michell) y Joseph Priestley. Publicó informes científicos y estuvo siempre al tanto de muchos de los avances que se producían en la ciencia, siendo la primera persona que en Inglaterra aceptó las teorías de Lavoisier sobre el oxígeno. También tradujo a Linneo al inglés, introduciendo los términos «estambre» y «pistilo» en el lenguaje de la botánica. Al mismo tiempo, se interesó por las inversiones en canales, apoyó la creación de una fábrica siderúrgica y entabló una sólida amistad con Josiah Wedgwood, que hizo una fortuna diseñando y fabricando cerámicas, y participó con él en una campaña contra la esclavitud. Ambos hombres se sintieron encantados cuando Robert Darwin, hijo de Erasmus, y Susannah Wedgwood, hija de Josiah, iniciaron una relación amorosa; pero Josiah falleció en 1795, un año antes de que se casaran. Susannah heredó de su padre 25 000 libras esterlinas, el equivalente a 2 000 000 de libras actuales; esto significaba, entre otras cosas, que su hijo Charles Robert Darwin

nunca tendría que preocuparse por ganarse la vida ejerciendo una profesión.

Para cuando Robert y Susannah contrajeron matrimonio, Erasmus Darwin había conseguido ya una fama ampliamente difundida, debida a la obra que justifica su lugar en la historia de la ciencia, pero inició también una obra poética basada en las teorías de Linneo y destinada a lograr que los lectores se iniciaran en el disfrute de la botánica. Su título era *The Loves of the Plants* y se publicó inicialmente de forma anónima en 1789, cuando Erasmus tenía 57 años de edad, tras un largo trabajo de gestación. Literalmente, Erasmus dotó a las plantas de un atractivo sexual, encantó a una amplia audiencia y parece ser que influyó en poetas como Shelley, Coleridge, Keats y Wordsworth.[7] A este éxito siguió en 1792 *The Economy of Vegetation* (un libro al que se suele llamar *The Botanic Garden* (*El jardín botánico*), que es en realidad el título de una colección a la que pertenece *The Economy of Vegetation* y *The Loves of the Plants*), en el que los 2440 versos de las poesías llevan como aclaración unas 80 000 palabras en notas, que configuran todo un libro sobre el mundo natural. Posteriormente, en 1794, Erasmus publicó el primer volumen de su obra en prosa *Zoonomía,* que constaba de más de 200 000 palabras, y al que seguiría en 1796 un segundo volumen que venía a ser más o menos un 50 por 100 más largo que el primero. Es en el volumen I de *Zoonomía* donde Erasmus expone por fin de manera completa su teoría sobre la evolución, a la que había aludido en sus obras poéticas previas, aunque esta teoría sólo ocupa un capítulo de los cuarenta que tiene este primer volumen, muchos de los cuales tratan de medicina y biología.

Las ideas de Erasmus Darwin sobre la evolución van mucho más allá de ser meras especulaciones y generalidades, aunque, por supuesto, este pensador estaba limitado por lo reducidos que eran los conocimientos científicos en aquella época. Eras-

mus Darwin explica con detalle la evidencia de que las especies han sufrido cambios en el pasado y llama la atención especialmente sobre el modo en que dichos cambios se han producido tanto en plantas, como en animales, por la intervención deliberada del ser humano, por ejemplo, al criar caballos de carreras más rápidos o desarrollar cultivos más productivos mediante procesos de selección artificial —algo que sería una característica crucial en la teoría formulada por su nieto. También indica el modo en que los descendientes heredan las características transmitidas por sus padres, destacando, entre otros casos, el de «una camada de gatos con una zarpa de más en cada pata», un caso que él mismo conoció. Explica el modo en que distintas adaptaciones capacitan a las distintas especies para obtener alimento, y menciona (adelantándose aquí también a Charles Darwin) que «algunos pájaros han adquirido una mayor dureza en los picos para partir nueces, como es el caso de los loros. Otros, como los gorriones, han desarrollado picos adaptados para cascar semillas más duras. Otros los tienen adaptados para vaciar semillas más blandas…». Lo más impresionante de todo surgió cuando Erasmus, que, desde luego, era un huttoniano, llegó a la creencia de que toda la vida existente en la Tierra puede provenir de una fuente común (por implicación, esto incluiría a los seres humanos):

> Sería demasiado audaz imaginar que en el enorme período de tiempo transcurrido desde que la Tierra comenzó a existir, quizá millones de eras[8] antes de que empezara la historia de la humanidad, sería también demasiado audaz imaginar que todos los animales de sangre caliente han surgido de un filamento vivo al que LA GRAN CAUSA PRIMERA dotó de animalidad, con el poder de generar nuevas partes, acompañadas de nuevas propensiones…

Para Erasmus, Dios existe todavía, pero sólo como la causa primera que puso en marcha los procesos de la vida en la Tierra; no hay lugar aquí para un Dios que intervenga de vez en cuando para crear nuevas especies, sino que hay una idea clara

de que, cualesquiera que sean los orígenes de la vida, una vez que ésta existe, evoluciona y se adapta siguiendo las leyes naturales, sin que exista intervención exterior alguna.[9] Sin embargo, Erasmus no sabía cuáles eran esas leyes que gobernaban la evolución. Su conjetura era que lo que producía cambios en los cuerpos de los animales vivos y de las plantas eran sus esfuerzos por conseguir algo que necesitaban (por ejemplo, alimento) o para escapar de los depredadores. Esto sucedería en un proceso similar al de un levantador de pesos que aumenta su musculatura. Pero Erasmus pensaba que estas características adquiridas pasarían luego a la descendencia del que las había adquirido, produciendo un cambio evolutivo. Por ejemplo, un ave zancuda a la que no le agradara que sus plumas se mojaran se esforzaría constantemente por evitar, en la medida de lo posible, el contacto con el agua, por lo que estiraría sus patas alargándolas un poquito. Sus descendientes heredarían esas patas ligeramente más largas y, a lo largo de muchas generaciones, este proceso repetido podría convertir a un ave cuyas patas fueran como las de un cisne en una que las tuviera como las de un flamenco.

Aunque esta idea estaba equivocada, no era un disparate, dado el nivel de conocimientos que se tenía a finales del siglo y Erasmus Darwin merece que se le reconozca el mérito por haber intentado al menos encontrar una explicación científica para el hecho de la evolución. Junto con muchas otras actividades, Erasmus Darwin continuó desarrollando sus teorías durante el resto de su vida y, en 1803, se publicó *The Temple of Nature or the Origin of Society (El templo de la naturaleza o el origen de la sociedad)*, donde hablaba en verso sobre la evolución de la vida desde una mota microscópica hasta la diversidad existente en la actualidad. Una vez más, los versos iban acompañados de gran número de notas que hubieran bastado por sí solas para hacer un libro. Sin embargo, esta vez Erasmus no consiguió un éxito

de ventas; sus ideas casi ateas y evolucionistas fueron condenadas, ya que estaban claramente fuera de lugar en una sociedad que se encontraba en guerra con la Francia napoleónica y ansiaba la estabilidad y la seguridad, en vez de la revolución y la evolución. Además, el propio Erasmus no estaba ya allí para defender su causa, porque había fallecido tranquilamente en su casa el 18 de abril de 1802, a los 70 años de edad. No obstante, quizá precisamente por la situación política existente, fue en la Francia napoleónica donde se asumieron y desarrollaron, en algunos aspectos de manera más completa, teorías similares a las de Erasmus Darwin.

JEAN-BAPTISTE LAMARCK: LA TEORÍA LAMARCKIANA DE LA EVOLUCIÓN

Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet de Lamarck, por llamarle con su nombre completo, fue miembro de la baja nobleza francesa (es una verdad empírica que, cuanto más bajo fuera el título nobiliario, más larga era la lista de nombres) y nació en Bazentin, Picardía, el 1 de agosto de 1744. Se educó en el colegio de los jesuitas de Amiens desde los 11 años de edad hasta los 15, y probablemente estuviera en principio destinado a ser sacerdote, pero los detalles relativos a los primeros años de su vida son bastante vagos. En 1760, cuando su padre murió, Lamarck partió para hacerse soldado y se unió al ejército que estaba combatiendo en los Países Bajos durante la guerra de los Siete Años. Esta guerra terminó en 1763 y parece ser que Lamarck se interesó por la botánica como resultado de haber podido observar la naturaleza en los destinos sucesivos que tuvo en el Mediterráneo y en el este de Francia. En 1768, recibió una herida que le obligó a abandonar la carrera militar y se estableció en París, donde estuvo trabajando en un banco y asistiendo a clases de medicina y botánica. Diez años más tarde consiguió

hacerse un nombre como botánico al publicar su libro *Flore Française* (*Flora francesa*), que se convirtió en el texto de referencia para la clasificación de las plantas que crecían en Francia. Por efecto de este libro y con el patrocinio de Buffon, que le había ayudado a publicarlo, Lamarck fue elegido miembro de la Académie des Sciences, y pronto estuvo en situación de poder prescindir de su empleo en el banco.

El patrocinio de Buffon tuvo un precio. En 1781, le fue encomendada a Lamarck la nada envidiable tarea de ser preceptor y acompañante de Georges, un hijo de Buffon que era inútil total, durante un recorrido por Europa; pero, al menos, este viaje le dio a Lamarck una oportunidad para ver más del mundo natural. Después de sus viajes, Lamarck ocupó una serie de empleos modestos relacionados con la botánica y con el Jardin du Roi, aunque sus intereses iban mucho más allá de la botánica, e incluso de la biología, llegando a abarcar también la meteorología, la física y la química. Participó en la reorganización del Jardin du Roi después de la Revolución Francesa y en 1793 se le asignaron responsabilidades como profesor para el estudio de lo que entonces se llamó «insectos y gusanos» en el nuevo Museo de Historia Natural de Francia; fue Lamarck quien dio a este conjunto o mezcolanza de especies el nombre de invertebrados. Como reformador, y al no estar contaminado por ninguna relación odiosa con la recaudación de impuestos, parece ser que Lamarck sobrevivió a la revolución sin recibir ni siquiera amenazas personales. Como profesor, Lamarck fue requerido para pronunciar la serie anual de conferencias que se organizaban en el museo. Estas conferencias muestran cómo iban evolucionando gradualmente sus teorías sobre la evolución, siendo en 1800 cuando mencionó por primera vez la idea de que las especies no son inmutables. En una descripción de los animales, descendiendo paso a paso desde las formas más complejas hasta las más simples y clasificándolas según lo que

él llamó, un tanto confusamente, su «degradación», decía Lamarck que los invertebrados:

> … nos muestran aún mejor que los otros esa degradación asombrosa en cuanto a organización y esa disminución progresiva en las facultades animales que debe suscitar un enorme interés en el naturalista filosófico. Finalmente, nos lleva de una manera gradual al estadio último de animalización, es decir, a los animales más imperfectos, organizados de la forma más simple, aquellos en los que, de hecho, difícilmente se reconoce su animalidad. Fue con éstos, quizá, con los que comenzó la naturaleza, mientras formaba todos los demás, necesitando para ello mucho tiempo y unas circunstancias favorables.[10]

En otras palabras, aunque su argumentación se desarrolla de arriba hacia abajo, lo que Lamarck dice es que los animales más simples evolucionan hasta convertirse en los más complejos — y obsérvese la referencia a «mucho tiempo» como requisito para este proceso.

El biógrafo de Lamarck, L. J. Jordanova, dice que «no hay indicios» de que este científico francés conociera las teorías de Erasmus Darwin; el biógrafo de Darwin, Desmond King-Hele, dice que las teorías de Lamarck estaban «casi con toda seguridad» influenciadas por la *Zoonomía*. Nunca sabremos la verdad, pero en cierto modo el comportamiento de Lamarck fue muy similar al de Darwin. Aunque se conoce poco sobre su vida privada, sabemos que tuvo seis hijos de una mujer con la que vivió, y que no se casó con ella hasta que esta mujer estuvo agonizando. Posteriormente, se casó al menos dos veces más (hay ciertos indicios de un cuarto matrimonio) y tuvo al menos otros dos hijos. Pero, a diferencia de Erasmus Darwin (o incluso de Charles Darwin), Lamarck tenía un estilo literario pésimo y parece ser que era incapaz de expresar sus ideas claramente por escrito (como muestra el ejemplo anterior, que no es en absoluto uno de los peores).

Estas teorías sobre la evolución aparecen resumidas en su épica *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres* (*Historia natural de los animales sin vértebras*), publicada en seis volúmenes

desde 1815 hasta 1822, cuando Lamarck tenía ya 78 años y estaba ciego. Falleció en París el 18 de diciembre de 1829. Para hacemos una idea, las teorías de Lamarck sobre la evolución pueden resumirse en las cuatro «leyes» que él presentó en el primer volumen del libro, publicado en 1815:

> Primera ley: En virtud de los poderes propios de la vida hay una tendencia constante al aumento del volumen en todos los cuerpos orgánicos y al estiramiento de todas sus partes hasta un límite determinado por la propia vida.

(Esto es más o menos cierto; parece existir una cierta ventaja evolutiva por tener un cuerpo más grande, y la mayoría de las especies animales multicelulares han ido aumentando su tamaño en el transcurso de la evolución).

> Segunda ley: La producción de nuevos órganos en los animales es el resultado de experimentar nuevas necesidades de manera persistente, y de los nuevos movimientos que surgen y se mantienen a partir de dichas necesidades.

(Esto, como mínimo, no es totalmente erróneo; cuando las circunstancias del entorno cambian, hay presiones que favorecen ciertos procesos evolutivos. Pero Lamarck dice, equivocadamente, que los «nuevos órganos» se desarrollan «en los individuos», y no a través de unos cambios casi insignificantes que se van produciendo de una generación a la siguiente).

> Tercera ley: El desarrollo de órganos y sus facultades mantienen una relación constante con el uso de los órganos en cuestión.

(Es la teoría de que las patas del flamenco se van haciendo cada vez más largas porque el flamenco siempre se está estirando hacia arriba para evitar el contacto con el agua. Esto está claramente equivocado).

> Cuarta ley: Todo aquello que ha sido adquirido… o cambiado en la organización de un individuo a lo largo de su vida se conserva en el proceso de reproducción y los que han experimentado las alteraciones las transmiten a la generación siguiente.

(Éste es el núcleo del la teoría de Lamarck: la herencia de características adquiridas. Una equivocación total).

Sin embargo, quizá la afirmación más contundente hecha por Lamarck fue la que se le atragantó a Charles Lyell y le llevó a rechazar la idea de la evolución cuando escribió los *Principles*: el hecho de que Lamarck incluyera específicamente a los seres humanos en este proceso.

A las teorías de Lamarck se opuso de manera tajante el influyente Georges Cuvier, que creía firmemente en que las especies eran fijas e inamovibles, pero dichas teorías encontraron un defensor en Isidore-Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), que trabajó con Lamarck en París. Desgraciadamente, el apoyo de Saint-Hilaire hizo al menos tanto daño como bien a la causa lamarckiana. Saint-Hilaire desarrolló sus propias teorías a partir de las de Lamarck y llegó a estar muy cerca de la idea de selección natural, sugiriendo que el tipo de «nuevos órganos» mencionados por Lamarck podrían no ser siempre beneficiosos y, en la década de 1820, escribió:

> Si estas modificaciones conducen a efectos perniciosos, los animales que presenten dichos cambios perecen y son reemplazados por otros que tengan una forma algo diferente, una forma que ha cambiado de tal modo que se adapte al nuevo entorno.[11]

Esto incluye elementos de las teorías de Lamarck y también el germen para la teoría de la supervivencia de los mejor adaptados. Sin embargo, Saint-Hilaire también se adhirió a teorías descabelladas sobre las relaciones entre las especies y, aunque hizo una gran cantidad de trabajos muy coherentes sobre anatomía comparada, fue demasiado lejos cuando afirmó haber identificado la misma configuración corporal básica en los vertebrados y los moluscos. Esta afirmación le hizo ser objeto de críticas más feroces por parte de Cuvier y desacreditó toda su obra, incluidas sus teorías sobre la evolución. Hacia finales de la década de 1820, cuando Lamarck ya había muerto y su prin-

cipal defensor estaba en gran medida desacreditado, Charles Darwin tuvo el camino despejado para retomar los hilos de la cuestión. Pero le llevó mucho tiempo tejer estos hilos para formar una teoría coherente de la evolución, y aún tardó más en hacer acopio de valor para publicar sus propias teorías.

Charles Darwin: su vida

En relación con Charles Darwin se han propagado dos mitos, ninguno de los cuales se corresponde con la verdad. El primero, al que ya hemos aludido, es que era un joven caballero diletante que tuvo la suerte de hacer un viaje alrededor del mundo, durante el cual vio la evidencia, más bien obvia, de la evolución en funcionamiento y encontró una explicación que cualquier contemporáneo suyo razonablemente inteligente podría haber discurrido en las mismas circunstancias. El segundo es que era un genio raro cuyo único destello de perspicacia hizo que la ciencia se adelantara una generación o más. De hecho, tanto Charles Darwin como la teoría de la selección natural fueron en gran medida productos de su tiempo, pero, además, Darwin era extraordinariamente capaz de trabajar duro, con un esmero y una persistencia nada habituales a la hora de buscar la verdad científica en una amplia gama de disciplinas.

En la época en que Erasmus Darwin murió, su hijo Robert estaba bien situado, trabajando con éxito en un consultorio médico cerca de Shrewsbury, y se había mudado recientemente a una casa elegante que se había hecho construir, llamada The Mount, que quedó terminada en 1800. Robert se parecía físicamente a su padre, con una estatura de más de 1,80 metros y tendencia a engordar con la edad; siguiendo la tradición de los Darwin, fue padre de una saludable prole de niños (aunque no a la misma escala de su padre), pero Erasmus no vivió para ver el nacimiento de su nieto Charles, que fue el segundo más joven

de aquella prole. Sus hermanas Marianne, Caroline y Susan nacieron en 1798, 1800 y 1803, su hermano mayor Erasmus en 1804, Charles Robert Darwin el 12 de febrero de 1809 y, finalmente, Emily Catherine (conocida en la familia como Catty) llegó al mundo en 1810, cuando su madre Susannah tenía 44 años. Parece ser que Charles tuvo una infancia idílica, mimado por sus tres hermanas mayores, con libertad para vagar por los jardines de la casa y por los campos cercanos; Caroline le enseñó en casa los conocimientos básicos de lectura y escritura hasta que cumplió los 8 años y también aprendió con su hermano mayor al que respetaba. La situación cambió de una manera drástica en 1817. En la primavera de aquel año, Charles comenzó a asistir a la escuela local, hasta que en 1818 entró como alumno interno en la escuela de Shrewsbury, donde su hermano Erasmus ya estaba estudiando. Aparte de esto, en julio de 1817, después de una vida de preocupaciones por las enfermedades de uno u otro de los niños, la madre de Charles Darwin falleció, víctima de una súbita y dolorosa enfermedad intestinal a los 52 años de edad. Robert Darwin nunca se repuso de esta pérdida y, lejos de seguir el ejemplo de su padre con un segundo matrimonio feliz, prohibió que se hablara de su desaparecida esposa y padeció frecuentes ataques de depresión durante el resto de su vida. Su prohibición tuvo seguramente efecto, ya que posteriormente Charles escribiría que se acordaba muy poco de su madre.

En lo referente a gobernar la casa, Marianne y Caroline tenían edad suficiente para hacerse cargo y más tarde las hermanas más jóvenes desempeñaron también su papel en este asunto. Algunos historiadores (y psicólogos) argumentan que la muerte de su madre y, especialmente, la reacción de su padre debieron producir un fuerte impacto en el joven Charles y seguramente configuraron su personalidad futura; otros sugieren que en un ambiente familiar con muchas hermanas y numero-

sos sirvientes su madre habría sido para él una figura más lejana que lo que sería actualmente en el caso de un niño de 8 años de edad, y que su muerte probablemente no le dejó marcas duraderas. Sin embargo, el hecho de que Charles fuera enviado a un internado justo un año después de morir su madre, quedando así separado de aquel entorno familiar tan acogedor, aunque le acercara más a su hermano Erasmus, sugiere que aquella combinación de factores que se dio en 1817 y 1818 sí produjo realmente un profundo impacto en él. La escuela de Shrewsbury estaba bastante cerca de The Mount, a unos 15 minutos a través de los campos, con lo que era factible hacer visitas a casa con relativa frecuencia, pero para un niño de 9 años que está fuera de su casa por primera vez no era la situación muy diferente por el hecho de que su casa estuviera a 15 minutos o a 15 días de viaje.

Durante el tiempo que pasó en Shrewsbury, Darwin desarrolló un profundo interés por la historia natural, dando largos paseos para observar la naturaleza en los alrededores,[12] recogiendo especímenes y estudiando detenidamente algunos libros de la biblioteca de su padre. En 1822, cuando Erasmus estaba en el último curso de la escuela y Charles tenía 13 años, el hermano mayor desarrolló un breve pero apasionado interés por la química (un tema que estaba muy de moda en aquella época) y no le fue difícil convencer a Charles para que actuara como su ayudante para montar un laboratorio propio en The Mount, cosa que consiguieron hacer con 50 libras esterlinas aportadas por su complaciente padre. Posteriormente, durante aquel mismo año, a Erasmus le llegó el momento de ir a Cambridge y, a partir de entonces, Charles se encargaba del laboratorio él solo, siempre que estaba en casa.

Erasmus, siguiendo la tradición familiar, estudió para hacerse médico, pero carecía de vocación para ejercer esta profesión y encontró aburrida la rutina académica de Cambridge, mien-

tras que las actividades que realizaba fuera de programa eran mucho más de su gusto. A Charles le resultaba igualmente tediosa la vida sin Erasmus en la escuela de Shrewsbury, pero se sintió compensado cuando le permitieron visitarle durante el verano de 1823 y disfrutó de lo que sólo se podría llamar una temporada de juergas, lo cual tuvo claramente una mala influencia en aquel muchacho de 14 años. Tras regresar a su casa, se apasionó por disparar a las aves de caza, llegando a ser más aficionado a los deportes que a las tareas académicas de la escuela, y mostrando unos signos tan evidentes de estar convirtiéndose en un golfo que, en 1825, Robert Darwin lo sacó de la escuela y lo convirtió en su ayudante durante unos pocos meses, intentando inculcar en él algo de la tradición médica de los Darwin. A continuación, el muchacho fue enviado a Edimburgo para que estudiara medicina. Aunque Charles sólo tenía 16 años, Erasmus ya había terminado sus tres años en Cambridge e iba a pasar un año en Edimburgo para completar sus estudios de medicina; la idea era que Erasmus cuidara de Charles mientras éste asistía a clases de medicina durante aquel año, después del cual estaría ya suficientemente habituado y tendría la edad adecuada (y era de esperar que fuera suficientemente maduro) para trabajar con formalidad y por su cuenta con el fin de obtener la titulación de medicina. Pero las cosas no funcionaron así.

En muchos aspectos, aquel año en Edimburgo fue una reedición de la temporada de juergas en Cambridge, aunque Erasmus se las arregló para aprobar por los pelos sus asignaturas y ambos jóvenes lograron evitar que le llegaran a su padre informes detallados sobre sus actividades extraacadémicas. Las posibilidades de que Charles pudiera llegar a ser médico se esfumaron, sin embargo, no porque descuidara sus estudios, sino por sus reparos excesivos. A Charles le encantaban algunos aspectos de los estudios de medicina, aunque se ponía enfermo cuando veía la disección de un cadáver. Pero el momento decisivo

llegó cuando vio practicar dos operaciones, una de ellas a un niño, del único modo que era posible entonces, es decir, sin anestesia. En particular la imagen del niño gritando le produjo una profunda impresión, sobre la cual escribió posteriormente en su *Autobiografía*:

> Me fui corriendo antes de que terminaran. Tampoco volví a asistir a una operación, porque ningún incentivo podía ser lo suficientemente fuerte como para obligarme a hacerlo; esto fue mucho antes de que llegaran los benditos días del cloroformo.
>
> Aquellos dos casos me tuvieron completamente obsesionado durante más de un año.[13]

Siendo incapaz de decidirse a admitir este fracaso ante su padre, Darwin regresó a Edimburgo en octubre de 1826, supuestamente para continuar sus estudios de medicina, pero se matriculó en historia natural, asistiendo a clases de geología. En particular fue influido por Robert Grant (1793-1874), un escocés dedicado a la anatomía comparada y experto en animales marinos, que estaba fascinado por las babosas de mar. Grant era un evolucionista que defendía las teorías de Lamarck y también compartía algunas de las ideas de Saint-Hilaire sobre la configuración universal de los cuerpos; transmitió estos conocimientos al joven Darwin, que ya había leído la *Zoonomía* durante sus estudios de medicina, aunque, según decía en su autobiografía, sin que las ideas evolucionistas llegaran a impresionarle en aquel momento. Pero, Grant le animó a que realizara sus propios estudios con las criaturas que ambos encontraban por la costa. En cuanto a la geología, Darwin conoció la discusión entre los neptunistas, que pensaban que el agua había configurado las características de la Tierra, y los plutonistas (o vulcanistas) que veían en el calor (el gran fuego central) la fuerza motriz que había impulsado esta configuración. Darwin prefería esta última explicación. Pero en abril de 1827, aunque Darwin, que sólo tenía 18 años, había encontrado ya algo que le

interesaba profundamente y estaba decidido a trabajar duro en ello, estaba claro que la farsa de sus estudios de medicina no se podía mantener por más tiempo y se marchó de Edimburgo definitivamente, sin obtener título oficial alguno. Quizá con el fin de retrasar la inevitable confrontación con su padre, tardó cierto tiempo en volver a The Mount. Después de un breve recorrido por Escocia, fue por primera vez a Londres, donde se reunió con su hermana Caroline y fue su primo Harry Wedgwood, que acababa de obtener el título de abogado para ejercer ante los tribunales superiores, quien se encargó de enseñarle Londres. Luego se trasladó a París, donde se encontró con Josiah Wedgwood II (padre de Harry e hijo del Wedgwood que había sido íntimo amigo de su abuelo Erasmus) y sus lujas Fanny y Emma, que volvían a Inglaterra desde Suiza.

29. Dibujo del HMS *Beagle* incluido en el *Journal of Researches*, de Darwin, 1845.

Sin embargo, en agosto, llegó la hora de enfrentarse a la verdad, y el resultado fue que Robert Darwin insistió en que la única salida de Charles era ir a Cambridge y obtener un título, para que luego Robert pudiera colocarlo como pastor en alguna

parroquia rural, que era la colocación respetable que se solía buscar entonces para los hijos menores que salían golfos. Después de un verano repartido entre los pasatiempos campestres de los ricos (cazar y acudir a fiestas) y empollar bastante desesperadamente para conseguir que sus conocimientos de lenguas clásicas llegaran al nivel requerido, Charles Darwin fue admitido formalmente en el Christ's College en el otoño de 1827 y, después de empollar aún más, ocupó su plaza allí a principios de 1828. Una vez más estaba en compañía de Erasmus, que entonces estaba terminando su licenciatura en medicina y luego, como premio, partiría para hacer el Grand Tour de Europa. Para Charles, que se enfrentaba a cuatro años de estudio y sólo tenía en perspectiva una vida de párroco rural, este contraste tuvo que ser difícil de aceptar.

Los tiempos de Darwin como estudiante en Cambridge siguieron la pauta que éste había adoptado durante los últimos meses que pasó en Edimburgo; descuidó sus estudios oficiales, pero se enfrascó en estudiar lo que realmente le interesaba: el mundo natural. Esta vez, gozó de la protección de John Henslow (1795-1861), profesor de botánica en Cambridge, que se convirtió en amigo y maestro al mismo tiempo. También estudió geología con Adam Sedgwick (1785-1873), que ocupaba la cátedra Woodward de geología. Este profesor era excepcional en el trabajo de campo, aunque rechazaba las teorías actualistas de Hutton y Lyell. Ambos profesores, Henslow y Sedgwick, consideraron a Darwin como un alumno sobresaliente, con una habilidad intelectual y una capacidad para trabajar duramente que se pusieron de manifiesto cuando, después de un esfuerzo desesperado para empollar en el último momento con el fin de ponerse al día en todo lo que había descuidado por dedicarse a la botánica y a la geología, sorprendió a todos, incluso a sí mismo, consiguiendo un puesto muy respetable (el décimo de 178 estudiantes) en los exámenes celebrados a principios de 1831.

Pero, a pesar de la capacidad científica que había demostrado, el camino hacia una parroquia rural parecía más claro que nunca, sobre todo porque, mientras Charles había estado en Cambridge, Erasmus había conseguido convencer a su padre de que no se sentía capaz de ejercer la profesión de médico y había obtenido permiso para abandonar dicha profesión a los 25 años de edad y establecerse en Londres con una asignación que le pasaba el propio doctor Robert Darwin. Por muy indulgente que éste fuera, es lógico pensar que deseara que al menos uno de sus hijos ejerciera una profesión respetable.

Charles pasó el verano de 1831 en lo que él debió de considerar su última gran expedición geológica, estudiando las rocas de Gales, antes de regresar a The Mount el 29 de agosto. Allí se encontró con una carta totalmente inesperada, remitida por uno de sus tutores de Cambridge, George Peacock. Este le transmitía una invitación de su amigo el capitán Francis Beaufort (1774-1857), del Ministerio de Marina (y actualmente famoso por haber dado su nombre a la escala que se utiliza para medir la velocidad del viento), invitando a Darwin a participar en una expedición topográfica que se iba a realizar a bordo del *Beagle*, bajo el mando del capitán Robert FitzRoy, que buscaba un caballero para que le acompañara en aquel largo viaje y aprovechara la oportunidad de estudiar la historia natural y la geología de América del Sur. El nombre de Darwin había sido propuesto por Henslow, que también le envió una carta animándole a aprovechar la ocasión. Darwin no había sido el primer candidato para aquella plaza en el barco —por un momento Henslow había pensado en aprovechar él mismo la oportunidad y otro de sus protegidos la había rechazado, prefiriendo aceptar la vicaría de Bottisham, un pueblo situado al lado de Cambridge—. Pero Darwin cumplía plenamente los requisitos —FitzRoy quería llevar a un caballero, un miembro de su misma clase social, con el que pudiera tratar en un plano de igual-

dad durante el largo viaje, pues de otra manera se habría visto privado de cualquier contacto social, dada su posición suprema al mando del barco—. Por supuesto, el caballero en cuestión tendría que pagar su parte; el Ministerio de Marina insistía en que debía ser un naturalista competente para que pudiera aprovechar las oportunidades que ofrecía aquella expedición que viajaría a América del Sur y, posiblemente, alrededor del mundo. Sin embargo, cuando Henslow propuso a Beaufort (a través de Peacock) el nombre de Darwin, este nombre tocó una fibra sensible de Beaufort. Uno de los amigos íntimos del abuelo Erasmus Darwin había sido Richard Edgeworth, un hombre de los que le caían bien, que se había casado cuatro veces y había tenido 22 hijos. Edgeworth, que era doce años más joven que Erasmus, se había casado por cuarta y última vez en 1798 con miss Frances Beaufort, de 29 años y hermana de Francis Beaufort, que era hidrógrafo de la armada real en 1831. Por lo tanto, cuando Beaufort escribió a FitzRoy recomendando al joven Charles para las funciones de acompañante en el viaje y naturalista, aunque en realidad no lo conociera personalmente, fue para él un gran placer presentarlo como «un nieto del señor Darwin, el conocido filósofo y poeta —una persona ardorosa y emprendedora».[14]

El viaje del «Beagle»

Todavía hubo que superar algunos obstáculos antes de que quedara definitivamente decidida la misión que Darwin iba a llevar a cabo en el Beagle. Al principio, su padre, que iba a tener que financiar el viaje de Charles, se opuso a lo que parecía ser otra locura más, pero finalmente Josiah Wedgwood II, el tío de Charles Darwin, le convenció. Entonces, FitzRoy, un hombre muy temperamental, se sintió molesto por el modo en que parecían haberle adjudicado la compañía de Darwin, pensando

que no iba a aceptarlo con los ojos cerrados, y sugirió que podría haber encontrado por su cuenta otro acompañante; las cosas se suavizaron cuando Darwin y FitzRoy se conocieron e hicieron buenas migas el uno con el otro. Finalmente, todo se solucionó y el *Beagle*, un velero de tres mástiles con 27 metros de eslora, zarpó el 27 de diciembre de 1831, cuando Charles Darwin aún no había cumplido los 23 años de edad. No es necesario entrar en detalles sobre aquel viaje de cinco años de duración, que de hecho fue una vuelta al mundo, pero hay unos pocos aspectos que vale la pena mencionar. En primer lugar, Darwin no estuvo encerrado en el barco durante todo ese tiempo, sino que realizó largas expediciones por tierra recorriendo América del Sur, en particular mientras la tripulación del barco estaba ocupada realizando sus trabajos topográficos oficiales. En segundo lugar, adquirió fama en los círculos científicos como geólogo, y no como biólogo, como resultado de los envíos de fósiles y otras muestras que remitió a Inglaterra durante el viaje. Finalmente, hay otro detalle particular digno de ser mencionado: Darwin tuvo la experiencia de vivir un gran terremoto en Chile y pudo observar con sus propios ojos en qué medida aquella perturbación sísmica había elevado el terreno, constatando que algunos estratos de moluscos y crustáceos habían encallado en zonas secas y con una altura de aproximadamente un metro sobre el nivel del mar. Pudo así confirmar de primera mano las teorías formuladas por Lyell en sus *Principles of Geology*. Darwin había llevado consigo para el viaje el primer tomo de esta obra, el segundo tomo le llegó durante la expedición y el tercero le estaba esperando a su vuelta a Inglaterra en octubre de 1836. Viendo el mundo a través de los ojos de Lyell, se convirtió en un partidario declarado del actualismo y esto influyó profundamente en el desarrollo de sus ideas sobre la evolución. Como diría posteriormente, en otro momento de su vida:

> Siempre tengo la sensación de que la mitad de lo que he escrito en mis libros procede del cerebro de Lyell y de que nunca se lo he agradecido suficientemente… Siempre he pensado que el gran mérito de los *Principles* es que altera completamente las tendencias de la mente de quien lo lee.[15]

Al volver a su país, Darwin se encontró con una recepción con la que ni siquiera habría soñado nunca, y que desde luego tuvo que resultar asombrosa y a la vez gratificante para su padre. No tardó en conocer al propio Lyell en persona y fue presentado como un igual a los geólogos más preclaros del país. En enero de 1837 leyó ante la Geological Society de Londres un informe sobre el levantamiento de la costa en Chile (el descubrimiento más discutido del viaje) y, casi inmediatamente, fue elegido miembro de dicha sociedad (es significativo que no llegara a ser miembro de la Zoological Society hasta 1839, el mismo año en que fue elegido miembro de la Royal Society). Además de adquirir fama como geólogo, Darwin pronto fue aclamado también como escritor, siguiendo así el modelo de Lyell. Su primer proyecto fue el *Journal of Researches*,[16] en el que Darwin escribió sobre sus actividades durante el viaje, mientras FitzRoy escribía sobre aspectos más bien navales. Darwin no tardó en terminar su parte del trabajo en la redacción de sus diarios, pero la publicación se retrasó hasta 1839 debido a los compromisos de FitzRoy con la marina, que le dejaban poco tiempo para escribir —y también, todo hay que decirlo, porque FitzRoy no era muy bueno escribiendo—. Para disgusto de FitzRoy, quedó claro inmediatamente que la parte del libro escrita por Darwin suscitaba un interés mucho más amplio que la escrita por él, por lo que el diario de Darwin se reeditó rápidamente de forma independiente con el título *Voyage of the Beagle* (*El viaje del Beagle*).

1839 fue un gran año en la vida de Darwin —cumplió los 30 años, vio cómo se publicaba el *Journal*, se convirtió en miembro de la Royal Society y se casó con su prima Emma Wedgwood—.

Este año se sitúa justo en medio de lo que Darwin llamó posteriormente su período más creativo intelectualmente, que comenzó con el retomo del *Beagle* en 1836 y se alargó hasta 1842, año en que se marchó de Londres y se instaló con su nueva familia en Kent. Sin embargo, también durante este período, comenzó a sufrir una serie de enfermedades que lo debilitaron, sin que se haya sabido nunca la causa exacta de dichas enfermedades, que probablemente fueran el resultado de alguna infección contraída en los trópicos. El hecho de abandonar Londres, donde Darwin se había establecido inicialmente al volver a Inglaterra, fue en cierta medida consecuencia de las agitaciones políticas de la época, durante las cuales se podía ver a grupos reformistas, como los cañistas, manifestándose por las calles de la capital, y al ejército, que se encargaba de controlarlos. Los Darwin se trasladaron a Down House, en el pueblo de Down, Kent. El pueblo cambió posteriormente su nombre por el de Downe, pero la casa conservó el nombre sin variaciones en la ortografía.

El matrimonio de Charles y Emma fue duradero y feliz, frustrado sólo por la enfermedad recurrente de Darwin y las tempranas muertes de varios de sus hijos. Pero también tuvieron un buen número de hijos que sobrevivieron, algunos de los cuales llegaron a ser profesionales eminentes por méritos propios. William, el mayor, vivió desde 1839 hasta 1914; luego nacieron Arme (1841-1851), Mary (muerta a los tres semanas, en 1842), Henrietta (1843-1930), George (1845-1912), Elizabeth (1847-1926), Francis (1848-1925), Leonard (1850-1943), Horace (1851-1928) y Charles (1856-1858). Fijémonos en las fechas concretamente en el caso de Leonard: nació mucho antes de la publicación de *El origen de las especies* y vivió hasta bastante tiempo después de la fisión del átomo, lo cual nos da una idea del camino que siguió la ciencia en cuanto a cambios durante los cien años transcurridos desde 1850 hasta 1950. Pero no es

la vida de la familia lo que nos interesa aquí, salvo por el hecho de que constituyó un marco estable en el que se desarrollaron los trabajos de Charles Darwin. Lo que nos interesa es la propia obra de Darwin, y especialmente la teoría de la evolución por selección natural.

DARWIN DESARROLLA SU TEORÍA DE LA EVOLUCIÓN POR SELECCIÓN NATURAL

En la época en que regresó de su viaje (y quizás antes de su partida también) Darwin no tenía la menor duda de que la evolución era un hecho. Lo difícil era dar con el mecanismo natural que explicara este hecho, es decir, un modelo o una teoría sobre el modo en que funcionaba la evolución. En 1837 Darwin comenzó a escribir su primer cuaderno de notas sobre *The Transformation of Species* (*La transformación de las especies)* y estuvo desarrollando sus teorías evolucionistas en privado, mientras publicaba sus trabajos geológicos, que resultaron cruciales para que el debate entre el actualismo y el catastrofismo se decantara a favor del actualismo. En el otoño de 1838, no mucho antes de contraer matrimonio, Darwin dio lo que resultó ser un paso clave, cuando leyó el famoso *Essay on the Principle of Population* (*Ensayo sobre el principio de población)*, escrito por Thomas Malthus (1766-1834).[17] Inicialmente se publicó de forma anónima en 1798, pero este ensayo estaba en su sexta edición (entonces ya firmada) cuando Darwin lo leyó. El propio Malthus, que estudió en Cambridge y fue ordenado en 1788, escribió la primera versión de su ensayo mientras estaba trabajando como coadjutor, pero posteriormente llegó a ser un famoso economista y el primer profesor de economía política de Gran Bretaña. En este ensayo señaló que las poblaciones, incluidas las poblaciones humanas, crecían en progresión geométrica, duplicándose en un cierto intervalo de tiempo, para luego duplicarse

de nuevo en un intervalo de la misma duración, y así sucesivamente. En la época en que lo estaba escribiendo, la población humana de América del Norte realmente se estaba duplicando cada veinticinco años, y todo lo que se necesitaba para esto era que, por término medio, cada pareja, cuando su edad estaba en torno a los 25 años, tuviera cuatro hijos que a su vez sobrevivieran hasta los 25 años. Dada la fecundidad de su propia familia, es seguro que Charles Darwin consideró que este requisito era muy fácil de cumplir.

De hecho, si cada pareja de mamíferos, incluso los más lentos en reproducirse, como los elefantes, tuvieran cuatro descendientes que sobrevivieran y se reprodujeran a su vez, entonces al cabo de 750 años cada pareja inicial tendría 19 000 000 de descendientes vivos. Sin embargo, como Malthus señaló, en el siglo XVIII había en el mundo más o menos el mismo número de elefantes que en el año 1050. De esto dedujo que las poblaciones están controladas por la peste, por los depredadores y especialmente por el hecho de que la cantidad de alimentos disponibles es limitada (así como por la guerra en el caso de los seres humanos), de tal modo que, por término medio, cada pareja tiene sólo dos descendientes que sobreviven, salvo en casos especiales, como el que surge por la oportunidad de conseguir nuevas tierras para la colonización en América del Norte. La mayor parte de la descendencia muere sin haber llegado a reproducirse, si la naturaleza sigue su curso.

Los argumentos maltusianos fueron en realidad utilizados por los políticos del siglo XIX para justificar que los esfuerzos encaminados a mejorar la suerte de las clases trabajadoras estaban condenados al fracaso, ya que todas las mejoras de las condiciones de vida darían como resultado la supervivencia de más niños, y el consiguiente aumento de la población agotaría los recursos mejorados, con lo que un número aún mayor de personas se quedaría en el mismo estado abyecto de pobreza.[18]

Pero Darwin, en el otoño de 1838, llegó a una conclusión diferente. En ella aparecían los ingredientes de una teoría que explicaba cómo podía funcionar la evolución —presión demográfica, lucha por la supervivencia «entre miembros de la misma especie» (más exacta, mente, por supuesto, sería una lucha por reproducirse) y supervivencia (reproducción) de los individuos mejor adaptados (los «más aptos», es decir, los que se hallan en mejores condiciones, en el sentido de la llave que encaja en una cerradura o la pieza de un rompecabezas, y no en el sentido deportivo del término).

Darwin bosquejó estas ideas en un documento que los historiadores han fechado en 1839, y los desarrolló de una manera más completa en un esbozo de 35 páginas fechado por él mismo en 1842. La teoría de la evolución por selección natural estaba ya completa en todo lo esencial antes incluso de que se trasladara a Down House, y la comentó con unos pocos colegas de confianza, incluido Lyell, quien, para disgusto de Darwin, no se quedó convencido. Ante el temor a la reacción que esta teoría podía provocar en el público y preocupado por la posibilidad de que escandalizara a Emma, que era una cristiana muy convencional, Darwin la estuvo incubando durante dos décadas, aunque en 1844 desarrolló un esbozo de la teoría en un manuscrito de unas 50 000 palabras escritas en 189 páginas, encargando a un maestro local que se lo pasara a limpio y guardándolo luego entre sus papeles con una nota para Emma en la que le pedía que dicho manuscrito se publicara después de su muerte.

En realidad, puede que no estuviera incubando la teoría. En la segunda edición de *Voyage of the Beagle*, en la que trabajó en 1845, Darwin añadió una gran cantidad de materiales nuevos, diseminados aquí y allá entre las páginas. Howard Gruber ha señalado que es fácil reconocer estos párrafos comparando las dos ediciones y que, si extrajéramos todos esos materiales nue-

vos y los reuniéramos en un libro, formarían «un ensayo que refleja casi la totalidad de sus ideas» sobre la evolución por selección natural.[19] Lo único que puede explicar esto es que Darwin estuviera preocupado por la posteridad y por su prioridad en la formulación de la teoría. Si alguien más llegaba a desarrollarla, Darwin podría recurrir a su ensayo «fantasma» y poner de manifiesto que él la había pensado antes. Mientras tanto, para hacer más fácil que su teoría fuera aceptada cuando finalmente llegara a publicarla, decidió que necesitaba conseguir una cierta fama como biólogo. A partir de 1846, diez años después de que el *Beagle* le hubiera traído de vuelta a casa, comenzó a realizar un estudio exhaustivo sobre los cirrópodos, incluyendo en él parte de los materiales que había traído de América del Sur y realizando finalmente una obra definitiva en tres volúmenes, que quedó terminada en 1854. Fue una hazaña asombrosa para un hombre que no tenía hasta entonces ninguna reputación en este campo, que a menudo estaba afectado por su enfermedad, y que durante aquel tiempo sufrió la muerte de su padre en 1848 y la de Anne, su hija predilecta, en 1851. Esta obra le supuso ganar la Royal Medal de la Royal Society, el premio máximo que se otorgaba a un naturalista. A partir de entonces, empezó a ser reconocido como un biólogo de primera categoría, con un conocimiento minucioso de las sutiles diferencias existentes entre especies estrechamente relacionadas. Sin embargo, seguía dudando sobre la publicación de sus teorías relativas a la evolución, aunque, ante el apremio de un reducido grupo de personas de confianza con las que discutió dichas teorías, a mediados de la década de 1850 comenzó a reunir sus materiales y a organizarlos para formar lo que él concebía como un gran libro muy extenso, en el que presentaría unas pruebas de tanto peso que abrumaría a cualquier oponente. «A partir de septiembre de 1854», decía en su *Autobiografía*, «dediqué todo mi tiempo a ordenar mi enorme montón de notas re-

lativas a la observación y la experimentación sobre la transmutación de las especies». Es una cuestión dudosa si aquel libro habría visto alguna vez la luz del día mientras Darwin vivió, pero el hecho es que finalmente se vio obligado a publicarlo cuando otro naturalista llegó a desarrollar las mismas teorías.

Alfred Russel Wallace

El «otro» era Alfred Russel Wallace, un naturalista afincado en el Extremo Oriente, que en 1858 tenía 35 años de edad, la misma edad que tenía Darwin en 1844, cuando desarrolló de forma ampliada las líneas generales de su teoría. Es impactante el contraste entre la vida privilegiada de Darwin y la lucha por la supervivencia en la que se veía envuelto Wallace, y vale la pena mencionarlo como un ejemplo de que la ciencia en aquellos tiempos estaba dejando de ser una prerrogativa de los caballeros ricos que la cultivaban como afición o pasatiempo. Wallace nació en Usk, en Monmouthshire (actualmente Gwent), el 8 de enero de 1823. Fue el octavo de nueve hijos de una familia corriente; su padre era un procurador que ejercía más bien con poco éxito y que se encargó personalmente de dar a sus hijos una educación básica en su propia casa. En 1828, la familia se trasladó a Dulwich y al poco tiempo se estableció en Hertford, la ciudad natal de la madre de Alfred. Allí Alfred y uno de sus hermanos, John, asistieron a la escuela local de secundaria, pero Alfred tuvo que abandonarla aproximadamente a los 14 años de edad para ganarse la vida. En su autobiografía *My Life*, publicada en 1905, Wallace decía que la escuela había tenido poca influencia en él, pero que había leído con voracidad los libros de la gran colección que tenía su padre y otros de los que había podido disponer cuando su padre trabajó gestionando una pequeña biblioteca en Hertford. En 1837 (cuando Darwin ya había regresado de su famoso viaje), Wallace entró a trabajar con

su hermano mayor William, que era topógrafo. En este trabajo, disfrutó de la vida al aire libre, fascinado por los diferentes tipos de estratos rocosos que quedaban al descubierto cuando se realizaban obras para abrir canales y construir carreteras, e intrigado por los fósiles que aparecían durante este proceso. Pero el dinero y las perspectivas de futuro que podía ofrecer la topografía era escasos en aquellos tiempos, por lo que Wallace se hizo durante un breve tiempo aprendiz de relojero, actividad que abandonó sólo porque el relojero se trasladó a Londres, ciudad a la que Wallace no quiso seguirle. Entonces volvió a trabajar en la topografía con William, esta vez participando en el programa de parcelación de tierras en el centro de Gales —en aquel momento Wallace no era consciente de las implicaciones políticas, pero más tarde denostó contra aquel «robo de tierras»—.[20] Los dos hermanos se dedicaron también a la construcción, diseñando ellos mismos las estructuras con bastante éxito, a pesar de que carecían de formación como arquitectos y se basaban exclusivamente en lo que podían aprender en los libros. Sin embargo, entre unas cosas y otras, Alfred Wallace se iba interesando cada vez más por el estudio del mundo natural, leía los libros adecuados y comenzaba a reunir una colección científica de flores silvestres.

Estos tiempos relativamente buenos llegaron a su fin en 1843, cuando el padre de Alfred murió y los trabajos de topografía fueron escaseando cada vez más a causa de la recesión económica que afectó al país (para entonces, Darwin ya se había instalado en Down House y había escrito al menos dos borradores de la teoría de la evolución por selección natural). Alfred vivió durante unos pocos meses en Londres con su hermano John, que era constructor, sobreviviendo gracias a una pequeña herencia. Cuando ésta se agotó, en 1844, consiguió un empleo en una escuela de Leicester, donde enseñaba nociones básicas de lectura, escritura y aritmética a los muchachos más

jóvenes, y además daba clases de topografía a los mayores (lo que fue probablemente el motivo fundamental por el que consiguió este empleo, ya que cualquiera podía enseñar las letras y las cuatro reglas). Su salario era de 30 libras esterlinas anuales, con lo que podemos hacernos una idea del valor de las 50 libras que gastaron los jóvenes Charles y Erasmus Darwin en instalar el laboratorio químico en su casa. Wallace tenía entonces 21 años de edad, justo un año menos de los que tenía Darwin cuando obtuvo su licenciatura en Cambridge, y realizaba un trabajo sin salidas ni perspectivas. Sin embargo, durante la época que pasó en Leicester se produjeron dos acontecimientos importantes. Leyó por primera vez el Ensayo sobre el principio de población de Malthus, aunque esta obra no produjo inicialmente un impacto especial sobre su forma de pensar, y conoció a otro naturalista aficionado, pero entusiasta, Henry Bates (1825-1892), cuyo interés por la entomología era un adecuado complemento del interés de Wallace por las flores.

Una tragedia familiar rescató a Wallace de aquella vida de maestro de segunda línea que él mismo había aceptado. En febrero de 1845, su hermano William murió de neumonía y Alfred, después de liquidar los asuntos de William, decidió asumir por su cuenta el trabajo de topógrafo y se estableció en la ciudad de Neath, en el sur de Gales. Esta vez las cosas le fueron bien; en aquella época había mucho trabajo debido al gran despliegue del ferrocarril y Alfred pudo reunir rápidamente un pequeño capital, por primera vez en su vida. Llevó a su madre y a su hermano John a vivir con él en Neath y, con la ayuda de John, se introdujo una vez más en la rama de la arquitectura y las obras de construcción. Su interés por la historia natural se desarrolló ampliamente y recibió un notable impulso debido a la correspondencia con Bates. Sin embargo, Wallace se sentía cada vez más desilusionado y frustrado por el aspecto mercantil de la topografía y la construcción, ya que le resultaba difícil

tratar con empresas que le debían dinero pero retrasaban los pagos, y se sentía deprimido cuando, a veces, tenía que enfrentarse con pequeños deudores que realmente no podían hacer frente a los pagos. Después de visitar París en septiembre de 1847, donde visitó el Jardín des Plantes, Wallace ideó un plan para cambiar su vida de una vez por todas y le propuso a Bates utilizar la pequeña cantidad de dinero que Wallace había acumulado para financiar una expedición de dos hombres a América del Sur. Una vez allí, podrían financiar sus trabajos sobre historia natural enviando a Gran Bretaña especímenes que serían vendidos a los museos y a los ricos coleccionistas particulares que en aquellos tiempos estaban siempre a la búsqueda de curiosidades procedentes de los trópicos (en parte gracias a los informes de Darwin sobre el viaje del *Beagle*). Wallace, que había llegado a creer firmemente en la evolución, decía en su autobiografía: «[incluso antes de partir para esta expedición], el gran problema del origen de las especies estaba ya formulado con claridad en mi mente… creía firmemente que un estudio completo y minucioso de los fenómenos naturales conduciría en última instancia a una solución del misterio».

Los más o menos cuatro años explorando y reuniendo muestras y ejemplares en las junglas de Brasil, a menudo en unas condiciones de dureza extrema, dieron a Wallace una experiencia de primera mano con respecto al mundo de los seres vivos, la misma que había conseguido Darwin durante el viaje del *Beagle*, y le ayudaron a hacerse una reputación de naturalista debida a los informes que publicó como resultado de su trabajo de campo, y también a los especímenes que recogió. Sin embargo, la expedición estuvo lejos de ser un triunfo. El hermano menor de Alfred, Herbert, que viajó a Brasil para reunirse con él en 1849, murió de fiebre amarilla en 1851, y Alfred siempre se sintió culpable de la muerte de su hermano, pensando que Herbert nunca habría ido a Brasil si él, Alfred, no hubiera esta-

do allí. El propio Alfred Wallace estuvo a punto de morir como resultado de su aventura en América del Sur. Cuando iba navegando de regreso a su país, el barco en que viajaba, el bergantín *Helen*, que transportaba una carga de caucho, se incendió y se fue a pique, llevándose consigo los mejores especímenes de Wallace al fondo del mar. La tripulación y los pasajeros estuvieron diez días en el mar, en unos botes descubiertos, hasta ser rescatados, y Wallace regresó a Inglaterra a finales de 1852 casi sin un penique (aunque había tomado la precaución de asegurar su colección de especímenes en 150 libras esterlinas), sin cosa alguna que vender, pero con unas anotaciones que utilizó como base para varios informes científicos y para un libro, *Narrative of Travels in the Amazon and Rio Negro* (*Narración de viajes por el Amazonas y Rio Negro*), que logró un modesto éxito. Bates se había quedado en América del Sur y regresó tres años más tarde con sus ejemplares intactos, pero para entonces Wallace estaba ya en el otro extremo del planeta.

Durante los seis meses siguientes, Wallace asistió a reuniones científicas, estudió insectos en el Museo Británico, encontró tiempo para pasar unas breves vacaciones en Suiza y planificó la expedición siguiente. También conoció a Darwin en una reunión científica a principios de 1854, pero más tarde ninguno de ellos pudo recordar los detalles de este primer encuentro. Más importante es que ambos iniciaron una correspondencia, como consecuencia del interés de Darwin por un informe de Wallace sobre la variabilidad de las especies de mariposas en la cuenca del Amazonas; esto indujo a Darwin a convertirse en uno de los clientes de Wallace, ya que le compró algunos ejemplares que éste envió desde el Extremo Oriente, y, a veces, en sus notas se quejaba (amablemente) de los costes del envío por barco a Inglaterra. Wallace fue al Extremo Oriente porque pensó que el mejor modo de satisfacer su interés por el problema de las especies sería visitar una zona del planeta que

no hubiera sido explorada con anterioridad por otros naturalistas, ya que así los especímenes que enviara a Inglaterra tendrían un valor mayor, tanto científica como económicamente, y los ingresos obtenidos por ellos le servirían para financiarse adecuadamente. Los estudios que realizó en el Museo Británico, así como sus conversaciones con otros naturalistas, le convencieron de que el archipiélago malayo encajaba en sus planes y consiguió reunir dinero suficiente para partir hacia allí en la primavera de 1854,[21] unos seis meses antes de que Darwin comenzara a organizar su «enorme montón de notas», y esta vez acompañado por un ayudante de 16 años llamado Charles Allen.

Esta vez la expedición de Wallace fue un éxito en todos los sentidos, aunque de nuevo tuvo que soportar la dureza de viajar por regiones tropicales donde pocos occidentales habían estado hasta entonces. Estuvo viajando durante ocho años y en este tiempo publicó más de cuarenta informes científicos, que remitió a varios periódicos ingleses, regresando con sus colecciones de especímenes intactas. Además de desarrollar sus ideas sobre la evolución, su trabajo fue extraordinariamente importante para establecer el hábitat geográfico de las distintas especies, mostrando cómo se habían extendido de una isla a otra (posteriormente este trabajo se relacionaría con la idea de deriva continental). Sin embargo, por supuesto, es la evolución lo que nos interesa aquí. Influido, como Darwin, por la obra de Lyell, que determinó la gran antigüedad de la Tierra (lo que Darwin en una ocasión llamó «el regalo del tiempo») y el modo en que la acumulación de pequeños cambios puede producir como resultado grandes cambios, Wallace desarrolló la teoría de la evolución comparando ésta con la ramificación de un enorme árbol, con distintas ramas que crecen de un solo tronco, dividiéndose y separándose hasta llegar a dar pequeños tallos, que siguen creciendo, y que representan la diversidad de las espe-

cies de seres vivos (todas ellas derivadas de una cepa común) que existen en el mundo actualmente. Presentó estas teorías en un informe publicado en 1855, sin ofrecer en aquel momento explicación alguna sobre cómo o por qué se produce la división en especies (es decir, la división de las ramas en dos o más tallos estrechamente relacionados y que continúan creciendo).

Darwin y sus amigos recibieron con agrado este informe, pero algunos, incluido Lyell, empezaron a preocuparse por la posibilidad de que Wallace o algún otro se adelantase a Darwin, si éste no publicaba pronto sus trabajos —Lyell aún no estaba del todo convencido con respecto a la selección natural, pero como amigo y buen científico estaba deseando que la teoría se publicase, por una parte para establecer la prioridad de Darwin, y también para que se iniciase un debate más amplio. El clima de opinión era entonces mucho más favorable a un debate abierto sobre la evolución, que lo que lo había sido veinte años antes, pero Darwin seguía sin ver la urgencia y continuaba seleccionando la enorme cantidad de pruebas de que disponía para apoyar la idea de la selección natural. En su correspondencia con Wallace dejó caer algunas alusiones en el sentido de que estaba preparando una obra sobre el tema para su publicación, pero no daba detalles sobre la teoría; la intención era advertir a Wallace de que iba por delante de él en este juego particular. Pero estas alusiones tuvieron el efecto de animar a Wallace y estimularle para que siguiera desarrollando sus propias teorías.

El acontecimiento llegó en febrero de 1858, cuando Wallace se encontraba enfermo de unas fiebres en Temate, en las islas Molucas. Mientras yacía en cama todo el día, pensando sobre el problema de las especies, Wallace recordó la obra de Thomas Malthus. Al preguntarse por qué en cada generación hay algunos individuos que sobreviven, mientras la mayoría perece, se dio cuenta de que esto no se debía al azar; los que vivían y lue-

go, a su vez, se reproducían debían ser los que estaban mejor adaptados a las condiciones que predominaran en el entorno en aquel momento. Los que eran más resistentes a la enfermedad sobrevivían a cualquier enfermedad que pudieran contraer, los más rápidos escapaban de los depredadores, y así sucesivamente. «Entonces, de repente, se me ocurrió que este proceso automático necesariamente mejoraría la raza, porque en cada generación los individuos inferiores serían exterminados inevitablemente y quedarían los superiores —es decir, sobrevivirían los más aptos».[22]

Este es el aspecto crucial de la teoría de la evolución por selección natural. Primero, los descendientes se parecen a sus progenitores, pero en cada generación aparecen ligeras diferencias entre unos individuos y otros. Sólo los individuos mejor adaptados al entorno sobreviven para reproducirse, por lo que las ligeras diferencias que les hacen tener éxito se transmiten selectivamente a la generación siguiente y se convierten en norma. Cuando las condiciones cambian, o cuando las especies colonizan nuevos territorios (como Darwin vio en el caso de los pájaros de las islas Galápagos y Wallace en el archipiélago Malayo), dichas especies cambian para adaptarse a las nuevas condiciones y como resultado surgen nuevas especies. Lo que ni Darwin ni Wallace sabían, y no quedaría claro hasta bien entrado el siglo XX, era cómo se producía la herencia o de dónde procedían las variaciones (véase el capítulo 14). Sin embargo, una vez observado el hecho de la herencia con leves variaciones, la selección natural explicaba cómo, si pasaba un espacio de tiempo suficiente, la evolución pudo producir un antílope adaptado a un estilo de vida de apacentamiento, así como el propio pasto, un león adaptado a comer antílopes, un pájaro que dependiera de un cierto tipo de semillas para su alimentación, o cualquier otra especie de las que existen actualmente en

la Tierra, incluida la especie humana, a partir de un único antepasado común.

Fue la experiencia de estas reflexiones en su lecho de enfermo durante el mes de febrero de 1858 lo que indujo a Wallace a escribir un informe titulado *«On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely from the Original Type»* (*«Sobre la tendencia de las variedades a transformarse indefinidamente a partir de un tipo original»*), que envió a Darwin junto con una carta en la que le pedía su opinión sobre el contenido de este trabajo. Este envío llegó a Down House el 18 de junio de 1858. El susto de Darwin al ver un texto que se adelantaba a sus propias teorías, como Lyell y otros ya habían advertido que podía suceder, se produjo casi simultáneamente con otro susto, pero éste más personal: justo diez día después, su hijo pequeño Charles Waring Darwin moría de escarlatina. A pesar de sus problemas familiares, Darwin se preocupó inmediatamente de ser justo con Wallace, enviando el informe a Lyell, con el siguiente comentario:

> Vuestras palabras, en el sentido de que alguien se me anticiparía, se han hecho realidad de una manera implacable… Jamás he visto una coincidencia más sorprendente; si Wallace hubiera tenido el manuscrito que redacté en 1842, no podría haber escrito un resumen mejor… Por supuesto, lo voy a escribir inmediatamente y se lo voy a ofrecer a alguna revista.[23]

Pero Lyell, conjuntamente con el naturalista Joseph Hooker (1817-1911), otro miembro del círculo de científicos que rodeaban a Darwin, ideó un plan alternativo. Se hicieron cargo del asunto, quitándoselo a Darwin de sus manos (Darwin se alegró de que se encargaran de todo mientras él asumía la pérdida de su pequeño Charles, consolaba a su Emma y hacía los preparativos para el funeral), y se les ocurrió la idea de añadir el esbozo de la teoría de Darwin de 1844 al informe de Wallace, y ofrecérselo a la Linnean Society como una publicación conjunta. El informe se leyó ante la Linnean Society el 1 de julio, sin que por el momento se organizara ningún gran revuelo,[24] y

se publicó a su debido tiempo con el impresionante título *On the tendency of species to form varieties; and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection (Sobre la tendencia de las especies a formar variedades; y sobre la perpetuación de las variedades y las especies por medios naturales de selección)* por Charles Darwin Esq., FRS, FLS, & FGS y Alfred Wallace Esq., editado por sir Charles Lyell, FRS, FLS, y J. D. Flooker Esq., MD, VPRS, FLS, & c. ¡Lo de «& c.» es el no va más!

La publicación de «El origen de las especies» de Darwin

Se podría pensar que Wallace tuvo que sentirse más que enfadado por este arrogante modo de disponer de su trabajo, sin tan siquiera consultarle, pero en realidad estuvo encantado y, en lo sucesivo, siempre se refirió a la teoría de la evolución por selección natural llamándola darwinismo, llegando incluso a escribir un libro con este título. Mucho más tarde, escribiría lo siguiente: «uno de los grandes logros de mi informe de 1858 es que obligó a Darwin a escribir y publicar su obra El origen de las especies sin más retrasos».[25] Desde luego, lo hizo: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life (Sobre el origen de las especies mediante la selección natural, o la subsistencia de las razas mejor dotadas en la lucha por la vida)* fue publicado por John Murray el 24 de noviembre de 1859 y, ciertamente produjo una gran impresión en la comunidad científica y en todo el mundo. Darwin continuó escribiendo otros libros importantes, acumuló una gran fortuna y disfrutó en su vejez rodeado por su familia en Down House, donde murió el 19 de abril de 1882; en general, sin embargo, se mantuvo al margen del debate público sobre la evolución y la selección natural. También Wallace escribió más libros, prosperó durante cierto tiempo, aunque de una forma más modesta, y se convirtió en un entusiasta del es-

piritismo, lo cual enturbió su reputación como científico. Sus ideas espiritistas impregnaron también sus teorías sobre los seres humanos, a los que consideraba especialmente tocados por Dios y no sometidos a las mismas leyes evolucionistas que regían para otras especies. A los 43 años de edad, en 1866, se casó con Annie Mitten, que entonces sólo tenía 18 años, y la pareja tuvo una hija y un hijo. Sin embargo, vivieron acosados por unas estrecheces económicas que no terminaron hasta 1880, cuando, como resultado de una petición que fue inicialmente idea de Darwin y Thomas Henry Huxley,[26] y fue firmada por varios científicos prominentes, la reina Victoria concedió a Wallace una pensión vitalicia de 200 libras esterlinas anuales. Fue elegido miembro de la Royal Society en 1893, recibió la Orden del Mérito en 1910 y murió en Broadstone, Dorset, el 7 de noviembre de 1913. Charles Darwin es el primer científico nacido después de 1800 que aparece en estas páginas; Alfred Wallace es el primero fallecido después de 1900. A pesar de que la ciencia consiguió muchos otros logros durante el siglo XIX, los avances protagonizados por estos dos científicos están por encima de todos ellos.

Capítulo 10

ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

Aunque la figura de Charles Darwin domina en cualquier exposición sobre la ciencia en el siglo XIX, este personaje es en cierto modo una anomalía. Fue precisamente durante el siglo XIX —que coincide casi exactamente con la vida de Darwin— cuando la ciencia dio el viraje para dejar de ser un pasatiempo de caballeros, en el que los intereses y la capacidad de un solo individuo podían producir un profundo impacto, y convertirse en toda una profesión para una población más amplia, donde el progreso depende del trabajo de muchos individuos que son, hasta cierto punto, intercambiables. Incluso en el caso de la teoría de la selección natural, como ya hemos visto, si a Darwin no se le hubiera ocurrido la idea, se le habría ocurrido a Wallace, y a partir de ahora veremos cada vez más frecuentemente que los descubrimientos se realizan más o menos simultáneamente, siendo sus autores distintas personas que trabajan independientemente y, en gran medida, sin que los unos conozcan los hallazgos de los otros. La otra cara de la moneda, desgraciadamente, es que el número creciente de científicos trae consigo una inercia cada vez mayor y la consiguiente resistencia a admitir cambios, lo que significa que, demasiado a menudo, cuando algún individuo brillante da con una teoría nueva y profunda sobre el modo en que funciona el mundo, esta teoría no se acepta inmediatamente o no se valora su mérito, por lo que puede pasar una generación hasta que se abre ca-

mino en el mundo de los conocimientos científicos aceptados por todo el colectivo.

En breve veremos cómo funciona esta inercia en el caso de la reacción (o falta de reacción) que provocaron las teorías de John Dalton sobre los átomos; también la propia vida de Dalton nos ofrecerá un ejemplo preciso del modo en que avanza la ciencia. Cuando Dalton nació, en 1766, probablemente no había en todo el mundo más de 300 personas a las que se pudiera aplicar el calificativo de *científicos* según las pautas actuales. Hacia 1800, cuando Dalton estaba a punto de terminar el trabajo por el que es recordado actualmente, el número de estos científicos auténticos estaría en torno al millar. En la época en que murió, en 1844, había alrededor de 10 000, y hacia 1900 serían aproximadamente 100 000. Poco más o menos, el número de científicos estuvo duplicándose cada cincuenta años durante el siglo XIX. Pero recordemos que la población total de Europa se duplicó entre 1750 y 1850, pasando de unos 100 millones a alrededor de 200 millones; teniendo en cuenta sólo la población de Gran Bretaña, ésta se multiplicó por dos entre 1800 y 1850, aumentando desde aproximadamente 9 millones de habitantes hasta unos 18 millones. Por lo tanto, el número de científicos creció en la misma proporción que la población total, y no de una manera tan impresionante como puede parecer a primera vista viendo sólo las cifras del número de científicos).[1]

ELEMENTS

	Wt		Wt
Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	54	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

30. Símbolos de Dalton para los elementos químicos.

LOS TRABAJOS DE HUMPHRY DAVY SOBRE LOS GASES; LA INVESTIGACIÓN ELECTROQUÍMICA

La transición de la ciencia de aficionados a la ciencia profesional queda muy bien ejemplificada si se observa la carrera de Humphry Davy, que en realidad era más joven que Dalton, aunque su vida fue más breve. Davy nació en Penzance, Cor-

nualles, el 17 de diciembre de 1778. Cornualles era entonces todavía un país casi separado de Inglaterra y el idioma de Cornualles no estaba del todo muerto, pero Davy tuvo desde su temprana edad unas ambiciones que iban más allá de los confines de su condado nativo. El padre de Davy, Robert, poseía una pequeña granja y también trabajaba tallando la madera, pero nunca conoció el éxito económico. Su madre, Grace, puso más tarde una sombrerería junto con una mujer francesa que había escapado de la Revolución, pero, a pesar de su contribución a la economía familiar, la situación de la familia llegó a ser tan difícil que Humphry, el mayor de los cinco hijos, tuvo que ir a los 9 años de edad a vivir con el padre adoptivo de su madre, John Tonkin, que era cirujano. En 1794, cuando el padre de Humphry murió, dejando a la familia nada más que deudas, fue Tonkin quien aconsejó a Davy, que había estudiado en la escuela de enseñanza secundaria de Truro sin demostrar ninguna capacidad intelectual extraordinaria, que entrara como aprendiz con el farmacéutico local, con la aspiración, en última instancia, de ir algún día a Edimburgo a estudiar medicina. Durante este tiempo, Davy aprendió también la lengua francesa, que le enseñó un sacerdote francés refugiado y que pronto resultaría de inestimable utilidad para el joven.

Parece ser que Davy fue un aprendiz prometedor y siguió un programa autodidacta que recuerda lo que hizo Benjamín Thompson más o menos a la misma edad. Desde luego, podía haberse convertido en un buen farmacéutico e incluso en médico, pero el invierno de 1797-1798 marcó un punto de inflexión en la vida del joven. A finales de 1797, poco antes de cumplir 19 años, leyó en su versión original el *Traite Élémentaire* de Lavoisier y se quedó fascinado por la química. Unas pocas semanas antes, la madre de Davy, que seguía viuda y luchando por llegar a cubrir las necesidades de la familia, había aceptado como huésped para el invierno a un joven enfermo de tubercu-

losis, enviado al clima relativamente suave de Cornualles por razones de salud. Este joven resultó ser Gregory Watt, el hijo de James Watt, y había estudiado química en la Universidad de Glasgow. Gregory Watt y Humphry Davy entablaron una amistad que duró hasta la muerte de Watt, acaecida en 1805, cuando tenía 27 años de edad. La presencia de Watt en Penzance durante aquel invierno supuso para Davy tener a alguien con quien compartir su interés cada vez mayor por la química. En 1798, tras realizar experimentos por cuenta propia, desarrolló en un manuscrito bastante largo sus teorías sobre el calor y la luz, cuestiones que en aquellos tiempos todavía se trataban en el campo de la química. Muchas de estas teorías, aunque hay que destacar que Davy descartaba la teoría del calórico, eran ingenuas y no resistirían actualmente un examen exhaustivo, pero en cualquier caso constituían un logro impresionante para un provinciano autodidacta de 19 años. A través de Gregory Watt y de su padre James Watt, Humphry Davy fue presentado por correspondencia al doctor Thomas Beddoes, de Bristol, al que envió su informe sobre el calor y la luz.

Beddoes (1760-1808) había sido alumno de Joseph Black en Edimburgo, antes de trasladarse a Londres y luego a Oxford, donde terminó sus estudios de medicina y enseñó química desde 1789 hasta 1792. Posteriormente, le intrigó el descubrimiento de distintos gases y decidió fundar una clínica para investigar el potencial de estos gases en los tratamientos médicos. Aunque actualmente nos pueda resultar alarmante, tenía la idea de que respirar hidrógeno podría curar la tuberculosis. Se trasladó a Bristol, donde estuvo ejerciendo la medicina mientras conseguía fondos para lo que fue, a partir de 1798, el Pneumatic Institute. Beddoes necesitaba un ayudante para que le ayudara con los trabajos químicos y el joven Davy consiguió el empleo. Abandonó Penzance el 2 de octubre de 1798, un par de meses antes de cumplir los 20 años.

Fue en Bristol donde Davy llevó a cabo los experimentos que hicieron que su nombre fuera más conocido, a saber, los experimentos con el gas que actualmente llamamos óxido nitroso. No viendo otro modo de averiguar cómo afectaba este gas al cuerpo humano, Davy preparó «cuatro cuartos de galón» de óxido nitroso en una bolsa de seda e inhaló su contenido, después de haber vaciado sus pulmones lo más posible. Descubrió inmediatamente las propiedades embriagadoras de este gas, que pronto pasó a llamarse «gas hilarante», al ponerse de moda entre los que buscaban este placer. Un poco más tarde, cuando una muela del juicio le estaba produciendo unas molestias considerables, Davy descubrió también, accidentalmente, que el óxido nitroso aliviaba la sensación de dolor y llegó a escribir, en 1799, que «probablemente tenga un uso beneficioso durante las operaciones quirúrgicas». En aquella época, desgraciadamente, no se hizo caso de esta sugerencia, siendo el dentista americano Horace Wells, en 1844, el que utilizó por primera vez el «gas hilarante» para las extracciones dentarias.

Davy continuó experimentando en su propio cuerpo con la inhalación de distintos gases, con resultados casi fatales en una ocasión. Estaba experimentando con la sustancia conocida como gas de agua (en realidad, una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno), que se obtenía haciendo que el vapor de agua pasara sobre brasas de carbón. El monóxido de carbono es extremadamente venenoso y produce rápidamente y sin dolor un profundo sueño que conduce a la muerte, razón por la cual muchos suicidas optan por matarse respirando los gases del tubo de escape de un coche. Antes de desmayarse, Davy tuvo el tiempo justo para dejar caer de sus labios la boquilla de la bolsa de la que estaba respirando, por lo que sólo sufrió un terrible dolor de cabeza al despertar. Pero si se hizo famoso fue precisamente gracias al óxido nitroso.

Después de pasar unos diez meses haciendo un estudio intensivo sobre las propiedades químicas y psicológicas de este gas, Davy informó sobre sus descubrimientos en un libro de más de 80 000 palabras, que escribió en menos de tres meses y publicó en 1800. El ritmo al que iba avanzando en su carrera no podía ser mejor. En 1800, cuando hubo finalizado sus trabajos sobre el óxido nitroso, Davy empezó a interesarse por la electricidad, como consecuencia de las noticias que recibió sobre el hecho de que Volta había inventado (o descubierto) la pila galvánica; comenzando con el experimento clásico de descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno por la acción de una corriente eléctrica, Davy pronto se convenció de que existía una relación significativa entre la química y la electricidad. Cuando estaba iniciando estos estudios, el conde Rumford (como se llamaba ya entonces Benjamín Thompson) estaba intentando poner en marcha la Royal Institution (RI) en Londres. La RI se había fundado en marzo de 1799, pero el primer profesor de química que se nombró para esta institución, Thomas Gamett, no estaba dando el resultado que se esperaba de él. Sus primeras conferencias habían funcionado bien, pero la segunda tanda adoleció de falta de preparación y de una presentación carente de entusiasmo. Había razones para que esto fuera así: la esposa de Gamett había fallecido recientemente y parece ser que, como consecuencia, Thomas había perdido la ilusión por realizar cualquier actividad. Gamett murió en 1802, cuando sólo tenía 36 años de edad. Cualesquiera que fueran las causas del fracaso de Gamett, Rumford tenía que actuar rápidamente si quería que la RI se desarrollara a partir de unos comienzos prometedores, por lo que pensó en Davy, la estrella más brillante que estaba ascendiendo en el firmamento de la química en Gran Bretaña, y le invitó a incorporarse a la institución como profesor ayudante de química y director del laboratorio de la RI, con un salario inicial de 100 guineas anuales, más el alojamiento en

la RI, con la posibilidad de ser el sucesor de Gamett en el puesto más alto. Davy aceptó y se hizo cargo del empleo el 16 de febrero de 1801. Tuvo un brillante éxito con sus conferencias, por una parte debido al contenido y a la emoción que suscitaban sus charlas, siempre minuciosamente preparadas y ensayadas, y por otra parte gracias al atractivo físico y al carisma del conferenciante, lo cual hacía que las jóvenes de la buena sociedad acudieran en tropel a las conferencias, independientemente de cuál fuera el contenido de éstas. Gamett, presionado por Rumford, no tardó en dimitir y Davy se convirtió en la estrella de la RI, siendo nombrado profesor de química en mayo de 1802, poco antes de que Rumford abandonara Londres para instalarse en París. Davy sólo contaba 23 años de edad y no había recibido una educación formal más allá de lo que la escuela secundaria de Truro le pudo ofrecer. En este sentido, fue uno de los últimos en la corriente de grandes científicos aficionados (aunque no era, en sentido estricto, un caballero); pero, como empleado a sueldo de la RI, fue también uno de los primeros científicos profesionales.

Aunque se le suele recordar como un científico «puro», los mayores logros de Davy consistieron en promocionar la ciencia entre sus contemporáneos, tanto de un modo general en la RI, como en términos de aplicaciones industriales y, particularmente, agrícolas. Por ejemplo, dio una famosa serie de conferencias, a través de un convenio con la Junta de Agricultura, sobre la importancia de la química para la agricultura. La importancia del tema y las habilidades de Davy como conferenciante quedan reflejadas en el hecho de que más tarde, en 1810, le llamaron de nuevo para que repitiera las conferencias en Dublín, cobrando 500 guineas y añadiendo otra serie de charlas sobre electroquímica; un año más tarde dio allí otra serie de conferencias, siendo sus honorarios esta vez 750 guineas —más de siete veces el salario que cobraba inicialmente en la RI en 1801.

También se le concedió el título de Doctor en Leyes, Honoris Causa, en el Trinity College de Dublín; fue el único título que recibió en toda su vida.

Podemos hacemos una idea de cómo era el método de Davy para preparar las conferencias a partir de un informe realizado por John Dalton cuando estaba dando una serie de conferencias en el RI en diciembre de 1803 (el año en que Davy se convirtió en miembro de la Royal Society). Dalton nos cuenta[2] que escribió su primera conferencia con el texto completo y, luego, Davy le llevó a la sala de conferencias la tarde anterior al día en que tenía que pronunciarla. Dalton tuvo que leer la conferencia de principio a fin, mientras Davy estaba sentado en el rincón más apartado de la sala y le escuchaba. «Al día siguiente, leí la conferencia ante una audiencia de entre 150 y 200 personas… Al terminar, recibí unos aplausos muy generosos». Sin embargo, Davy, al igual que muchos de sus contemporáneos (como ya veremos), se mostraba reacio a aceptar todas las implicaciones del modelo atómico de Dalton.

Las investigaciones electroquímicas que hizo Davy le llevaron a realizar un análisis y un resumen magistrales de esta joven ciencia en la Bakerian Lecture de la Royal Society en 1806 —por cierto, de una manera tan magistral e impresionante que al año siguiente la Academia Francesa le concedió una medalla y un premio, a pesar de que Gran Bretaña y Francia estaban todavía en guerra—. Poco después, haciendo pasar unas corrientes eléctricas a través de potasa y soda, consiguió aislar dos metales que hasta entonces habían sido desconocidos, a los que llamó potasio y sodio. En 1810, Davy aisló y dio nombre al cloro. Tras definir el concepto de elemento de manera precisa como una sustancia que no se puede descomponer mediante ningún proceso químico, demostró que el cloro es un elemento y que el componente clave de todos los ácidos es el hidrógeno, y no el oxígeno. Este fue el punto culminante de la carrera de Da-

vy como científico, aunque en muchos aspectos nunca desarrolló plenamente todo su potencial real, debido en parte a que su falta de formación le llevó a veces a realizar trabajos chapuceros que carecían de un análisis cuantitativo adecuado, y en parte también porque la fama y la fortuna se le subieron a la cabeza, de tal modo que empezó a disfrutar más de las oportunidades sociales que le proporcionaba su posición que de su trabajo científico. Fue nombrado caballero en 1812, tres días antes de casarse con una viuda rica y unos pocos meses antes de nombrar ayudante en el RI a Michael Faraday (que sería su sucesor). Aquel mismo año dimitió de su puesto de profesor de química del RI, siendo su sucesor inmediato William Brande (1788-1866), pero se mantuvo en su cargo de director del laboratorio. A continuación realizó un amplio recorrido por Europa con su esposa (y con Faraday), gracias a un pasaporte especial que le proporcionaron los franceses por ser un científico famoso (la guerra, por supuesto, continuaba y no terminó hasta 1815). Fue después de que el grupo regresara a Inglaterra, cuando Davy diseñó la famosa lámpara de seguridad para los mineros que lleva su nombre, aunque algunos comentaristas sugieren la posibilidad de que Faraday tuviera mucho que ver con ello, dado que el trabajo que le llevó a hacer este diseño fue sumamente meticuloso y esmerado, por lo tanto muy diferente de lo que Davy solía hacer. En 1818, Davy se convirtió en baronet y en 1820 fue elegido presidente de la Royal Society, cargo en el que se esmeraba con gran placer cuando había que desarrollar el ceremonial inherente a la jerarquía, y se convirtió en un esnob de tal calibre que, en 1824, fue el único miembro que se opuso a la elección de Faraday como miembro de la institución. Sin embargo, a partir de 1825, Davy contrajo una enfermedad crónica; se retiró de su trabajo como director del laboratorio del RI y ya no volvió a desempeñar papel alguno en los asuntos de la ciencia británica. A partir de 1827, viajó a Francia

y a Italia, donde el clima era más beneficioso para su salud, y murió, probablemente de un ataque al corazón, en Ginebra, el 29 de mayo de 1829, a los 51 años de edad.

Si Humphry Davy fue una de las primeras personas que se benefició de una lenta profesionalización de la ciencia, la carrera científica de John Dalton (tal como fue) muestra el largo camino que le quedaba aún por delante a este proceso en las primeras décadas del siglo XIX. Dalton nació en el pueblo de Eaglesfield, Cumberland, en 1766, probablemente la primera semana de septiembre. Procedía de una familia de cuáqueros, pero por alguna razón la fecha exacta de su nacimiento no fue inscrita en el registro cuáquero. Sabemos que tuvo tres hermanos que murieron jóvenes y otros dos, Jonathan y Mary, que sobrevivieron. Jonathan era el mayor, pero no hay datos que atestigüen si Mary era mayor o más joven que John. Su padre era tejedor y la familia vivía en una casita de dos habitaciones, una de ellas destinada a trabajar y hacer el resto de las rutinas diarias, y la otra utilizada como dormitorio. Dalton asistió a una escuela cuáquera donde, en vez de ser atiborrado con el latín, se le permitió desarrollar su afición por las matemáticas. Dalton atrajo sobre sí la atención de un cuáquero rico, Elihu Robinson, que le facilitó el acceso a sus libros y revistas. A los 12 años de edad, Dalton tuvo que empezar a contribuir a los ingresos familiares, por 1 que, al principio, intentó enseñar a niños que eran aún más jóvenes, aunque algunos fueran físicamente más grandes que él, impartiendo estas clases primero en su propia casa y luego en el templo cuáquero, cobrando unas tarifas modestas. Pero esta actividad no tuvo éxito y Dalton la abandonó para dedicarse a los trabajos agrícolas. Sin embargo, en 1781, fue liberado de pasar toda su vida en el campo, ya que se reunió con su hermano Jonathan, que ayudaba a uno de sus primos, George Bewley, a llevar una escuela para cuáqueros en Kendal, una ciudad próspera con una numerosa población cuá-

quera. En 1785, cuando su primo se retiró, los dos hermanos se hicieron cargo de la escuela, mientras su hermana les llevaba la casa. John Dalton permaneció allí hasta 1793. Fue desarrollando gradualmente su interés por la ciencia, mientras respondía y planteaba preguntas en las revistas populares de aquellos tiempos, y comenzaba una larga serie de observaciones meteorológicas, que anotó diariamente desde el 24 de marzo de 1787 hasta su muerte.

Frustrado por las oportunidades limitadas y la escasa remuneración económica que le ofrecía aquel empleo sin futuro, Dalton empezó a ambicionar convertirse en abogado o médico, y calculó cuánto podría costarle estudiar medicina en Edimburgo (como cuáquero, por supuesto, no podía ir a Oxford o a Cambridge a estudiar, independientemente de los costes). Desde luego, tenía capacidad intelectual para asumir este proyecto, pero algunos amigos le advirtieron de que no había esperanza de obtener los fondos necesarios para hacer realidad su pretensión. Por una parte para ganar un poco de dinero extra, y por otra a fin de satisfacer sus inclinaciones científicas, Dalton comenzó a pronunciar conferencias por las cuales cobraba una modesta tarifa, extendiendo gradualmente su ámbito geográfico hasta llegar a Manchester. En parte como resultado de la fama que consiguió gracias a este trabajo, en 1793 llegó a ser profesor de matemáticas y filosofía natural en un *college* que se acababa de fundar en 1786 en Manchester, que se llamaba simplemente New College. Poco después de trasladarse a Manchester, se publicó un libro en el que daba cuenta de sus observaciones meteorológicas y que había escrito mientras estuvo en Kendal. En un apéndice de este libro, Dalton habla sobre la naturaleza del vapor de agua y su relación con el aire, describiendo el vapor como partículas que existen entre las partículas del aire, de tal forma que «las presiones iguales y opuestas» ejercidas sobre una partícula de vapor por las partículas de aire «no

pueden acercarla a ninguna otra partícula de vapor, sin la cual no puede producirse la condensación». En una visión retrospectiva, esta idea puede considerarse como precursora de la teoría atómica de Dalton.[3]

Durante los 50 años que Dalton vivió allí, Manchester fue una ciudad que estuvo creciendo rápidamente, pues en aquella época la industria algodonera estaba saliendo de las casas particulares y se concentraba en fábricas situadas en las ciudades. Aunque no estaba directamente implicado en la industria, Dalton formó parte de las causas de su auge, ya que la única razón que justificaba la existencia de centros educativos como el New College era satisfacer la necesidad que aquella población creciente tenía de desarrollar la capacidad técnica que el nuevo modo de vida requería. Dalton enseñó allí hasta 1799; en aquella época era lo bastante bien conocido como para ganarse la vida decorosamente como preceptor privado y se quedó en Manchester durante el resto de su vida. Una razón por la que Dalton llegó a ser bien conocido, casi desde el momento en que llegó a Manchester, fue que era ciego para los colores. Previamente, esta peculiaridad no había sido reconocida, pero Dalton llegó a darse cuenta de que no podía ver los colores de la misma forma que los veían otras personas, y descubrió que su hermano también estaba afectado por esta limitación. En particular el azul y el rosa les resultaban a ambos indistinguibles. El 31 de octubre de 1794, Dalton leyó un informe ante la Literary and Philosophical Society de Manchester en el que explicaba su análisis detallado del síndrome que pronto llegó a conocerse como daltonismo (un nombre que todavía se utiliza en algunos lugares del mundo).

Durante aproximadamente los diez años siguientes, el apasionado interés que sentía Dalton por la meteorología le llevó a reflexionar profundamente sobre la naturaleza de una mezcla de gases, partiendo de las teorías sobre el vapor de agua que ya

hemos mencionado. Nunca llegó a desarrollar la teoría de que un gas estuviera formado por un enorme número de partículas en movimiento constante, que chocan unas con otras y con las paredes del recipiente que las contenga, sino que pensó sobre los gases en términos estáticos, como si estuvieran formados por partículas separadas entre sí mediante muelles. Sin embargo, incluso con esta desventaja en la posición de partida, llegó a considerar la relación entre los volúmenes que ocupaban distintos gases en condiciones diferentes de temperatura y presión, estudiando también el modo en que los gases se disolvían en agua y así mismo el modo en que influyen en las propiedades globales de los gases los pesos de las distintas partículas que los constituyen. En 1801 ya había descubierto la ley de las presiones parciales, según la cual la presión total ejercida por una mezcla de gases en el recipiente que la contiene es la suma de las presiones que ejercerían por separado los distintos gases en las misma condiciones (es decir, en el mismo recipiente y a la misma temperatura).

El modelo atómico de John Dalton: primera disertación sobre pesos atómicos

Es imposible reconstruir la trayectoria exacta del pensamiento de Dalton, ya que sus anotaciones son incompletas, pero poco después de 1800 se convenció de que cada elemento estaba formado por un tipo diferente de átomo que sólo existía en ese elemento, y el rasgo distintivo fundamental que hacía que un elemento fuera distinto de otros era el peso de sus átomos, teniendo el mismo peso todos los átomos de un elemento determinado, sin que dichos átomos pudieran diferenciarse unos de otros. Los átomos de los elementos no podían crearse ni destruirse. Sin embargo, los átomos de los elementos podían combinarse irnos con otros, siguiendo unas reglas específicas,

para formar «átomos compuestos» (lo que actualmente llamaríamos moléculas). Dalton llegó incluso a inventar un sistema de símbolos para representar los distintos elementos, aunque esta idea nunca encontró una aceptación amplia, siendo muy pronto suplantada por la notación alfabética que actualmente nos resulta tan familiar y que se basa en los nombres de los elementos (en algunos casos en sus nombres latinos). Quizás el mayor fallo del modelo de Dalton es que no se dio cuenta de que elementos como el hidrógeno se presentan en forma de moléculas (en la terminología actual) y no como átomos individuales —H_2 en vez de H—. En parte por esta razón, se equivocó en algunas combinaciones moleculares: según la notación moderna, Dalton habría pensado que el agua es HO en vez de H_2O.

Aunque algunas partes del modelo de Dalton fueron explicadas en diversos informes y conferencias, la primera exposición completa de su teoría se llevó a cabo en varias conferencias pronunciadas en la RI en diciembre de 1803 y enero de 1804, en las que Davy ayudó a Dalton a perfilar su presentación. El sistema apareció explicado (sin destacar en él ningún mérito particular) por Thomas Thomson en la tercera edición de su libro *System of Chemistry* en 1807, y en el libro del propio Dalton titulado *A new System of Chemical Philosophy*, que incluía una lista de pesos atómicos estimados y se publicó en 1808, aunque Dalton ya había presentado la primera tabla de pesos atómicos al final de un informe en 1803.

A pesar de la aparente modernidad y de la trascendencia del modelo de Dalton, éste no consiguió conquistar a la comunidad científica a finales de la primera década del siglo XIX. A muchas personas les resultó difícil, a veces por motivos filosóficos, aceptar la idea de los átomos (con la consiguiente implicación de que no había cosa alguna en los espacios situados entre ellos) e incluso muchos de aquellos que utilizaron la idea la consideraron como un mero instrumento heurístico, una herramienta

que podía usarse para averiguar el modo en que se comportaban los elementos, haciendo «como si» estuvieran compuestos por unas partículas diminutas, sin que tuviera que ser necesariamente cierto que «estuvieran» compuestos por unas partículas diminutas. Hubo que esperar casi medio siglo para que el átomo de Dalton se aceptara realmente como un concepto característico dentro de la química, y sólo en los primeros años del siglo XX (casi cien años después de que Dalton presentara su idea) se consiguió una demostración definitiva de la existencia de los átomos. Por lo que respecta a Dalton, ya no hizo más contribuciones al desarrollo de estas teorías, aunque fue colmado de honores durante toda su larga vida: entre otras cosas, se convirtió en miembro de la Royal Society en 1822 y sucedió a Davy como uno de los ocho únicos asociados extranjeros que había en la Academia Francesa en 1830. Cuando falleció, el 27 de julio de 1844 en Manchester, se le organizó un funeral por todo lo alto, que chocaba radicalmente con su estilo de vida cuáquero, incluida una comitiva de cien carruajes —pero, para entonces, la teoría atómica estaba ya plenamente en camino de llegar a ser una teoría aceptada.

JÖNS BERZELIUS Y EL ESTUDIO DE LOS ELEMENTOS

El siguiente paso crucial en el desarrollo de la teoría de Dalton lo había dado el químico sueco Jöns Berzelius, que nació en Väversunda el 20 de agosto de 1779. Su padre, que era maestro, murió cuando Berzelius tenía 4 años y su madre se casó después con un pastor de la Iglesia, Anders Ekmarck. En 1788, cuando murió su madre, Berzelius se fue a vivir con la familia de un tío y, en 1796, comenzó a estudiar medicina en la Universidad de Uppsala y, aunque tuvo que interrumpir sus estudios con el fin de trabajar para pagar las tasas académicas, consiguió el título de doctor en medicina en 1802. Después de doc-

torarse, Berzelius se trasladó a Estocolmo, donde trabajó al principio como ayudante, sin sueldo, con el químico Wilhelm Hisinger (1766-1852), posteriormente trabajó en condiciones similares como ayudante del catedrático de medicina y farmacia en la Facultad de Medicina de Estocolmo; lo hizo tan bien que, cuando el catedrático murió, en 1807, Berzelius recibió el nombramiento para sustituirle. Al poco tiempo, abandonó la medicina y se concentró exclusivamente en la química.

Sus primeros trabajos se ciñen a la rama de la electroquímica y se inspiró, al igual que Davy, en la obra de Volta, pero, gracias a su formación universitaria, Berzelius fue un experimentador mucho más meticuloso que Davy. Fue uno de los primeros que formularon la idea de que los compuestos químicos están formados por partes eléctricamente positivas y partes eléctricamente negativas (lo cual es cierto en alguna medida, pero no es una verdad universal) y fue uno de los primeros que aceptaron con entusiasmo la teoría atómica de Dalton. A partir de 1810, Berzelius llevó a cabo una serie de experimentos para medir las proporciones en que se combinan los distintos elementos entre sí y, en 1816, había llegado ya a estudiar 2000 compuestos diferentes. Estos experimentos contribuyeron en gran medida a proporcionar la base experimental que necesitaba la teoría de Dalton, y dieron a Berzelius la posibilidad de realizar una tabla razonablemente exacta con los pesos atómicos de los cuarenta elementos que se conocían en aquellos tiempos, unos pesos que se medían con relación al oxígeno, en vez de medirse con respecto al hidrógeno. También fue el inventor del sistema alfabético moderno de nomenclatura para los elementos, aunque tuvo que pasar mucho tiempo hasta que el uso de este sistema se generalizó. Mientras tanto, Berzelius y sus colegas aislaron e identificaron en Estocolmo varios elementos «nuevos», entre los que se encontraban el selenio, el torio, el litio y el vanadio.

Precisamente en torno a esta época, los químicos empezaban a considerar que los elementos se podían agrupar en «familias» con propiedades químicas similares: Berzelius dio el nombre de «halógenos» (que significa «generadores de sales») al grupo en el que figuran el cloro, el bromo y el yodo; como se le daba estupendamente inventar nombres, también acuñó los términos *química orgánica*, *catálisis* y *proteína*. Su *Textbook of Chemistry* (*Libro de texto de química*), publicado por primera vez en 1803, se reeditó muchas veces y ejerció una gran influencia en el desarrollo posterior de la química. Un hecho que nos da idea de su importancia como química y de lo estimado que era en Suecia es que el día de su boda, en 1835, el rey de Suecia le dio el título de barón. Murió en Estocolmo en 1848.

El número de Avogadro

Sin embargo, ni Berzelius ni Dalton (y desde luego ningún otro) dieron inmediatamente con las dos ideas que conjuntamente hicieron que la teoría atómica avanzara. Estas ideas fueron formuladas en 1811. En primer lugar, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) constató en 1808, y publicó en 1809, que los gases se combinan en proporciones simples de volumen, y que el volumen de los productos de la reacción, si éstos son también gaseosos, se relaciona de una forma simple con los volúmenes de los gases que reaccionan entre sí. Por ejemplo, dos volúmenes de hidrógeno se combinan con un volumen de oxígeno para producir dos volúmenes de vapor de agua. Este descubrimiento, junto con unos experimentos en los que se demostraba que todos los gases obedecen las mismas leyes de expansión y compresión, condujeron al italiano Amadeo Avogadro (1776-1856) a anunciar, en 1811, su hipótesis según la cual, a una temperatura dada, el mismo volumen de cualquier gas contiene el mismo número de partículas. En realidad

utilizó la palabra *moléculas*, pero donde Dalton usaba *átomo* para designar tanto lo que llamamos átomos como lo que llamamos moléculas, Avogadro utilizó *molécula* para referirse tanto a lo que llamamos moléculas como a lo que llamamos átomos. Para simplificar las cosas, nos atendremos aquí a la terminología moderna. La hipótesis de Avogadro explicaba el descubrimiento de Gay-Lussac si, por ejemplo, cada molécula de oxígeno contiene dos átomos de este elemento, que pueden separarse para repartirse entre las moléculas de hidrógeno. Esta constatación de que el oxígeno (y otros elementos) pueden existir en una forma molecular poliatómica (en este caso O_2 en vez de O) fue un paso decisivo hacia delante. De esta manera, dos volúmenes de hidrógeno contienen el doble de moléculas que un volumen de oxígeno y, cuando se combinan, cada molécula de oxígeno aporta un átomo a cada par de moléculas de hidrógeno, produciendo el mismo número de moléculas que había en el volumen inicial de hidrógeno.

Utilizando la notación moderna, $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$.

La hipótesis de William Prout sobre los pesos atómicos

En aquella época, las teorías de Avogadro cayeron en terreno baldío y durante décadas apenas hubo movimiento en el avance del desarrollo de hipótesis atómicas, este movimiento se vio obstaculizado por la falta de experimentos que pudieran comprobar las hipótesis. Paradójicamente, los experimentos realizados sólo sirvieron para generar una duda considerable con respecto a otra idea brillante que surgió por aquel entonces. En 1815, el químico británico William Prout (1785-1850), basándose en la obra de Dalton, sugirió que los pesos atómicos de todos los elementos eran múltiplos exactos del peso atómico del hidrógeno, lo cual implicaba que, en cierto modo, los elementos más pesados que el hidrógeno podían estar formados por

este elemento. Sin embargo, las técnicas experimentales de la primera mitad del siglo XIX fueron suficientemente buenas para demostrar que esta relación no se cumplía de una manera exacta, y que muchos pesos atómicos determinados mediante técnicas químicas no se podían expresar mediante números que fueran múltiplos perfectos del peso atómico del hidrógeno. Hubo que esperar al siglo XX para que se resolviera este problema gracias al descubrimiento de los isótopos (átomos del mismo elemento con pesos atómicos ligeramente diferentes, pero tales que cada isótopo tiene un peso atómico que es un múltiplo exacto del peso de un átomo de hidrógeno). La cuestión era que los pesos atómicos determinados químicamente son una media de los pesos atómicos de todos los isótopos de un elemento dado. Tras la resolución del problema, la hipótesis de Prout fue considerada una idea clave en relación con la naturaleza de los átomos.

Pero, aunque las sutilezas de la química a nivel atómico no ofrecieron grandes resultados en la investigación durante medio siglo, sin embargo se produjo un profundo desarrollo en el conocimiento de lo que sucedía a un nivel superior de organización dentro de la química. Los investigadores habían sido conscientes durante mucho tiempo de que existían dos variedades de sustancias químicas tales que todo lo que se encuentra en el mundo material se podía encuadrar en una de las dos. Algunas, como el agua o la sal común, cuando se calentaban parecían cambiar sus características (se ponían al rojo vivo, se fundían, se evaporaban, etc.), pero, al enfriarse, volvían a su estado químico inicial. Otras, como el azúcar o la madera, se quedaban completamente alteradas por la acción del calor, de tal forma que resultaba muy difícil, por ejemplo, «desquemar» un trozo de madera. Fue en 1807 cuando Berzelius formalizó la distinción entre dos tipos de materia. Dado que el primer grupo de sustancias está asociado con sistemas no relacionados con la

materia viva, mientras que el segundo grupo está estrechamente relacionado con sistemas vivos, eligió para estos grupos los nombres inorgánico y orgánico respectivamente. A medida que la química se fue desarrollando, quedó cada vez más claro que la materia orgánica está formada por compuestos que en gran medida son mucho más complejos que los de la materia inorgánica; sin embargo, también se pensaba que la naturaleza de las sustancias orgánicas estaba relacionada con la presencia de una «fuerza vital» que hacía que la química actuara de manera diferente en los seres vivos y en la materia inerte.

FRIEDRICH WÖHLER: ESTUDIOS SOBRE SUSTANCIAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS

La consecuencia era que las sustancias orgánicas «sólo» podían ser fabricadas por sistemas vivos y se produjo una gran sorpresa cuando, en 1828, el químico alemán Friedrich Wöhler (1800-1882) descubrió casualmente, en el transcurso de unos experimentos cuyo objetivo era muy diferente, que la urea (uno de los componentes que constituyen la orina) se podía producir calentando una sustancia que se llamaba cianato de amonio. El cianato de amonio estaba entonces considerado como una sustancia inorgánica, pero la definición de sustancia «orgánica» cambió a la luz de este y de otros experimentos similares realizados con materias orgánicas producidas a partir de sustancias que nunca se habían asociado con la vida. A finales del siglo XIX ya estaba claro que no había una misteriosa fuerza vital que estuviera actuando en la química orgánica y que existen dos cosas que distinguen los compuestos orgánicos de los inorgánicos. En primer lugar, los compuestos orgánicos son a menudo sustancias complejas, en el sentido de que cada molécula contiene muchos átomos, generalmente de diversos elementos. En segundo lugar, todos los compuestos orgánicos contienen car-

bono, siendo este elemento la causa de su complejidad, ya que, como veremos más adelante, los átomos de carbono son capaces de combinarse de muchas e interesantes maneras con muchos otros átomos y con otros átomos de carbono. Esto significa que el cianato de amonio, que contiene carbono, está considerado actualmente como una sustancia orgánica —pero esto no reduce en modo alguno la importancia del descubrimiento de Wöhler—. Hoy en día es posible incluso fabricar cadenas completas de ADN en el laboratorio a partir de sencillas sustancias inorgánicas.

Actualmente, la definición habitual de molécula orgánica dice que se llama así a cualquier molécula que contenga carbono, y la química orgánica es la química del carbono y sus compuestos. La vida está considerada como un producto de la química del carbono que obedece a las mismas reglas químicas que actúan en todo el mundo de los átomos y las moléculas. Junto con las teorías de la evolución formuladas por Darwin y Wallace, esta teoría de lo orgánico produjo durante el siglo XIX un cambio importante en las opiniones sobre el lugar que ocupa el ser humano en el universo. La selección natural nos dice que somos parte del reino animal, sin que haya prueba alguna de la existencia de un «alma» humana única; la química nos dice que los animales y las plantas forman parte del mundo físico, sin que haya prueba alguna de la existencia de una «fuerza vital» especial.

Concepto de valencia

En la época en que todo esto se iba aclarando, sin embargo, la química abordó finalmente la cuestión de los átomos. Entre los conceptos clave que emergieron de estas décadas de confusión, el químico inglés Edward Frankland (1825-1899) dio en 1852 el primer análisis razonablemente claro de lo que se co-

nocería como valencia: una medida de la capacidad de los «átomos» de un elemento determinado para combinarse con otros átomos. Entre las muchas expresiones utilizadas en los primeros tiempos para explicar esta propiedad, una de ellas, *equivalencia,* derivó hacia la palabra *valencia* utilizada actualmente. Por lo que respecta a las combinaciones químicas, en cierto sentido dos cantidades de hidrógeno equivalen a una de oxígeno, mientras que una de nitrógeno equivale a tres de hidrógeno, y así sucesivamente. En 1858, el escocés Archibald Couper (1831-1892) escribió un informe en el que introduce en la química el concepto de *enlaces,* simplificando así la idea de valencia y el modo en que los átomos se combinan. Según esto, se dice que el hidrógeno tiene valencia 1, en el sentido de que puede formar un enlace con otro átomo. El oxígeno tiene valencia 2, porque puede formar dos enlaces. Así, con bastante lógica, cada uno de los dos enlaces «pertenecientes» a un átomo de oxígeno puede unirse con un átomo de hidrógeno, formando una molécula de agua –H_2O, o si se prefiere H–O–H, donde los guiones representan enlaces. De un modo similar, el nitrógeno tiene valencia 3, es decir, tres enlaces, por lo que puede combinarse con tres átomos de hidrógeno a la vez, dando amoniaco, NH_3. Pero los enlaces pueden formarse también entre dos átomos de un mismo elemento, como sucede con el oxígeno O_2, que se puede representar como O = O. Lo mejor del caso es que el carbono tiene valencia 4, por lo que puede formar al mismo tiempo cuatro enlaces individuales con cuatro átomos distintos, incluso con otros átomos de carbono.[4] Esta propiedad es crucial en la química del carbono y Couper sugirió inmediatamente que los complejos compuestos de carbono que constituyen la base de la química orgánica podrían consistir en una cadena de átomos de carbono2 «dándose la mano» con otros átomos que estarían enganchados a los enlaces «sobrantes» a los lados de la cadena. La publicación del informe de

Couper se retrasó, y a causa de esto apareció la misma teoría antes y de manera independiente publicada por el químico alemán Friedrich August Kekulé (1829-1896); este hecho eclipsó en aquel momento la obra de Couper. Siete años más tarde, Kekulé tuvo la inspirada idea de que los átomos de carbono podrían unirse también formando anillos (la manera más frecuente sería un anillo de seis átomos de carbono formando un hexágono) con unos enlaces que saldrían hacia el exterior del anillo para conectar con otros átomos (o incluso con otros anillos de átomos).

Stanislao Cannizzaro: la distinción entre átomos y moléculas

A finales de la década de 1850, al estar ya en el aire unas teorías como las de Couper y Kekulé, todo estaba a punto para que alguien redescubriera la obra de Avogadro y la pusiera en el contexto adecuado. Esa persona fue Stanislao Cannizzaro y, aunque lo que realmente hizo puede explicarse de una manera muy sencilla, tuvo una vida tan interesante que es imposible resistirse a la tentación de desviarse brevemente para entresacar algunos de sus momentos más destacados. Cannizzaro, hijo de un magistrado, nació en Palermo, Sicilia, el 13 de julio de 1826. Estudió en Palermo, Nápoles, Pisa y Turín, antes de comenzar a trabajar como ayudante de laboratorio en Pisa, actividad que realizó desde 1845 a 1847. Después regresó a Sicilia para luchar en la fracasada rebelión contra el régimen borbónico del rey de Nápoles, un episodio de la ola de levantamientos que ha hecho que los historiadores llamen al año 1848 «el año de las revoluciones» en Europa (el padre de Cannizzaro era en aquella época jefe de policía, circunstancia que debió de hacer las cosas el doble de interesantes). Tras el fracaso de la rebelión, Cannizzaro, que había sido sentenciado a muerte en rebeldía,

marchó al exilio, concretamente a París, donde trabajó con Michel Chevreul (1786-1889), que era profesor de química en el Museo de Historia Natural. En 1851, Cannizzaro pudo regresar a Italia, donde enseñó química en el Collegio Nazionale de Alessandria, en el Piamonte,[5] antes de trasladarse a Génova en 1855 como profesor de química. Fue precisamente estando en Génova cuando supo de la hipótesis de Avogadro y la situó en el contexto de los avances que habían tenido lugar en la química desde 1811. En 1858, justo dos años después de la muerte de Avogadro, Cannizzaro escribió un opúsculo (lo que actualmente llamaríamos un borrador) en el que esbozó la diferencia esencial entre átomos y moléculas, despejando la confusión que existía desde la época en que se habían publicado los trabajos precursores de Dalton y Avogadro, y explicando cómo el comportamiento observado en los gases (las reglas de la combinación de volúmenes, las mediciones de la densidad del vapor, etc.), junto con la hipótesis de Avogadro, podía utilizarse para calcular los pesos atómicos y moleculares en relación con el peso de un átomo de hidrógeno; además, también confeccionó una tabla de pesos atómicos y moleculares. Este opúsculo circuló ampliamente en una conferencia internacional que se celebró en Karlsruhe, Alemania, en 1860, y tuvo una influencia decisiva en las teorías que llevaron al conocimiento de la tabla periódica de los elementos.

Sin embargo, algo distrajo a Cannizzaro impidiéndole seguir desarrollando estas teorías. A finales de 1860 se sumó a las tropas de Giuseppe Garibaldi para la invasión de Sicilia, que no sólo expulsó al régimen napolitano de la isla, sino que condujo rápidamente a la unificación de Italia bajo el reinado de Víctor Manuel II de Cerdeña. En 1861, después de haber estado luchando, Cannizzaro ejerció como catedrático de química en Palermo, donde permaneció hasta 1871, para trasladarse posteriormente a Roma, donde, aparte de ser catedrático de química

en la universidad, fundó el Instituto Italiano de Química, llegó a ser senador en el Parlamento y fue vicepresidente del Senado. Murió en Roma el 10 de mayo de 1910, tras haber vivido lo suficiente para ver cómo la existencia real de los átomos quedaba confirmada más allá de toda duda razonable.

Desarrollo de la tabla periódica por Mendeleiev y otros

La historia del descubrimiento (o invención) de la tabla periódica llevó consigo una curiosa mezcla de cosas que ilustran la gran probabilidad de que, cuando la situación está madura, varias personas realicen a la vez, pero independientemente, el mismo descubrimiento, aunque también demuestra lo habitual que es el rechazo a las nuevas ideas por parte de la vieja guardia. A principios de la década de 1860, pisando los talones a la obra de Cannizzaro, el químico industrial inglés John Newlands (1837-1898) y el mineralogista francés Alexandre Béguyer de Chancourtois (1820-1886) constataron cada uno por su lado que, si los elementos se ordenan según sus pesos atómicos, hay una pauta que se repite, en la cual los elementos situados a intervalos regulares, con unos pesos atómicos que difieren en cantidades que son múltiplos de ocho veces el peso atómico del hidrógeno, tienen propiedades similares los unos con respecto a los otros.[6] La obra de Béguyer, publicada en 1862, pasó sencillamente desapercibida (de lo cual, en parte, pudo tener él mismo la culpa por no explicar claramente su teoría y no haber aportado ni siquiera un diagrama explicativo para ilustrar dicha teoría), pero cuando en 1864 y 1865 Newlands, que no sabía nada del trabajo de Béguyer, publicó una serie de informes en los que se tocaba el tema, sufrió un destino aún peor que consistió en ser ridiculizado salvajemente por su colegas, quienes decían que la idea de ordenar los elementos químicos según sus pesos atómicos no era más inteligente que ordenarlos en

orden alfabético según sus nombres. El informe crucial que exponía esta teoría exhaustivamente fue rechazado por la Chemical Society y no se publicó hasta 1884, mucho después de que Dimitri Mendeleiev hubiera recibido todos los honores como inventor de la tabla periódica. En 1887 la Royal Society concedió a Newlands la medalla Davy, aunque nunca llegaron a elegirlo miembro de esta sociedad.

Pero hay que decir que Mendeleiev ni siquiera fue el tercero al que se le ocurrió la idea de la tabla periódica. Tal honor, las cosas como son, le corresponde al químico y físico alemán Julius Lothar Meyer (1830-1895), aunque como él mismo reconoció más tarde, hasta cierto punto le faltó valor para defender sus convicciones, siendo ésta la razón por la cual el premio recayó finalmente en Mendeleiev. Meyer se dio a conocer en el ámbito de la química por ser el autor de un libro de texto, *Die modernen Theorien der Chemie [Las modernas teorías de la química]*, que se publicó en 1864. Fue un seguidor entusiasta de las teorías de Cannizzaro y las expuso en este libro. Mientras lo estaba preparando, observó la relación existente entre las propiedades de un elemento químico y su peso atómico, pero no quiso incluir en un libro de texto una teoría nueva que aún no estaba debidamente comprobada, por lo que se limitó a hacer una mera alusión. Durante los años siguientes, Meyer desarrolló una versión más completa de la tabla periódica, pensando en incluirla en la segunda edición de su libro, que estaba preparada ya en 1868, pero no fue llevada a la imprenta hasta 1870. Por aquella época, Mendeleiev había presentado su versión de la tabla periódica, ignorando que todo aquel trabajo se había estado realizando en la misma línea en la década de 1860. Meyer siempre reconoció la prioridad de Mendeleiev, en gran medida porque éste había tenido el valor (o el descaro) de dar un paso que Meyer nunca había dado, consistente en predecir la necesidad de «nuevos» elementos para llenar los lugares que quedaban

vacíos en la tabla periódica. Sin embargo, el trabajo que Meyer había realizado de manera independiente recibió un amplio reconocimiento, por lo que Meyer y Mendeleiev compartieron la medalla Davy en 1882.

Es un poco sorprendente que Mendeleiev no tuviera conocimiento de todos los avances que había realizado la química en Europa occidental durante la década de 1860.[7] El había nacido en Tobolsk, Siberia, el 7 de febrero de 1834 (27 de enero en el calendario antiguo que se utilizaba todavía en Rusia en aquellos tiempos), siendo el menor de catorce hermanos. Su padre, Ivan Paulovich, que era director de la escuela local, se quedó ciego cuando Dimitri era todavía un niño, por lo que fue su madre, Marya Dimitrievna, quien tuvo que hacerse cargo en gran medida del mantenimiento de la familia. Era una mujer imbatible que montó una fábrica de vidrio para conseguir ingresos. El padre de Mendeleiev murió en 1847 y un año más tarde la fábrica de vidrio fue destruida por un incendio. Los hijos mayores eran ya más o menos independientes y Marya Dimitrievna estaba decidida a que su hijo menor recibiera la mejor educación posible, por lo que, a pesar de sus dificultades económicas, se lo llevó a San Petersburgo. Debido a los prejuicios existentes contra los estudiantes pobres que llegaban de las provincias, Mendeleiev no pudo conseguir una plaza en la universidad, pero se matriculó como estudiante de magisterio en 1850 en el Instituto Pedagógico, donde su padre había obtenido el título. Su madre murió sólo diez semanas más tarde, pero, según parece, Dimitri era tan decidido como lo había sido ella. Después de terminar sus estudios y trabajar como maestro durante un año en Odessa, presentó sus credenciales y logró que se le permitiera estudiar química en la Universidad de San Petersburgo, donde se licenció en 1856. Después de un par de años trabajando en la universidad, Mendeleiev participó en un programa de estudios patrocinado por el gobierno en París y Heidelberg,

donde trabajó bajo la dirección de Robert Bunsen y Gustav Robert Kirchhoff. En 1860 asistió al congreso de Karlsruhe, donde conoció a Cannizzaro, que puso allí en circulación su opúsculo sobre los pesos atómicos y moleculares. A su regreso a San Petersburgo, Mendeleiev se convirtió en profesor de química general del Instituto Técnico de esta ciudad y terminó su doctorado en 1865; en 1866 llegó a ser catedrático de química de la Universidad de San Petersburgo, puesto que ocupó hasta que fue obligado a «jubilarse» en 1891, aunque entonces sólo tenía 57 años de edad, pero se daba la circunstancia de que había tomado partido por los estudiantes durante una protesta contra el sistema académico ruso. Pasados tres años, se consideró que ya había expiado su culpa y fue nombrado director de la Oficina de Pesos y Medidas, un puesto que ocupó hasta su muerte, acaecida en San Petersburgo el 2 de febrero de 1907 (20 de enero según el calendario antiguo). Sólo le faltó ser uno de los primeros galardonados con el Premio Nobel —fue nominado en 1906, pero perdió por un voto frente a Henri Moissan (1852-1907), que fue el primero en aislar el flúor—. Mendeleiev falleció antes de que el comité de la fundación Nobel se reuniera otra vez (curiosamente, al igual que Moissan).

Mendeleiev, como Meyer, se convirtió en una figura conocida por haber escrito un libro de texto, *Principios de química,* que se publicó en dos volúmenes en 1868 y 1870. También como Meyer, llegó al conocimiento de la relación entre las propiedades químicas de los elementos y sus pesos atómicos mientras trabajaba en su libro y, en 1869, publicó el conocido informe titulado «Sobre la relación entre las propiedades de los elementos y sus pesos atómicos».[8] El aspecto primordial de la obra de Mendeleiev, el rasgo que le distingue de las demás personas que tuvieron ideas parecidas más o menos en la misma época, es que tuvo la audacia de reorganizar (ligeramente) el orden de los elementos, con el fin de hacer que encajaran con la pauta que él

había descubierto, y de dejar algunas casillas vacías en la tabla periódica para los elementos que aún no habían sido descubiertos. Los reordenamientos que hizo fueron realmente poca cosa. Al situar los elementos exactamente en orden según sus pesos atómicos, Mendeleiev se encontró con una disposición en forma de rejilla, parecida a un tablero de ajedrez, en la que los elementos aparecían en filas de ocho, unas encima de las otras, de tal forma que los elementos que tenían propiedades químicas similares quedaban unos debajo de otros en las columnas de la tabla. Surgieron algunas excepciones aparentes con respecto a esta disposición según el orden estricto de aumento de los pesos atómicos (los más ligeros en la parte superior izquierda del «tablero de ajedrez» y los más pesados en la parte inferior derecha). El telurio, por ejemplo, quedaba debajo del bromuro, que tenía unas propiedades químicas totalmente diferentes. Pero, el peso atómico del telurio es sólo un poquito mayor que el del yodo (las mediciones modernas dan 127,60 para el peso atómico del telurio y 126,90 para el del yodo, es decir, una diferencia de sólo un 0,55 por 100). Basta invertir el orden de estos dos elementos, poniendo el yodo, que tiene unas propiedades químicas similares a las del bromo, bajo este último, que es donde claramente le corresponde estar según sus propiedades químicas.

Reihen	Gruppo I. — R^2O	Gruppo II. — RO	Gruppo III. — R^2O^3	Gruppo IV. RH^4 RO^2	Gruppo V. RH^3 R^2O^5	Gruppo VI. RH^2 RO^3	Gruppo VII. RH R^2O^7	Gruppo VIII. — RO^4
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

31. Una de las primeras versiones de la tabla de los elementos químicos de Mendeleiev, 1871.

Lo que en Mendeleiev fue un mero acto de fe, estaba plenamente justificado, tal como se vio con claridad en el siglo XX con la investigación de la estructura del núcleo, que es la parte considerada como el corazón del átomo. Resulta que las propiedades químicas de un elemento dependen del número de protones que haya en el núcleo de cada átomo, es decir, del número atómico, mientras su peso atómico depende del número de protones y neutrones que hay en el núcleo. La versión moderna de la tabla periódica ordena los elementos según los valores crecientes de sus números atómicos, no según los valores crecientes de sus pesos atómicos; sin embargo, en la gran mayoría de los casos, los elementos que tienen un número atómico mayor, suelen tener también un peso atómico mayor. Sólo en unos pocos casos raros, la presencia de un par suplementario de neutrones hace que la sucesión de los elementos ordenados por pesos atómicos sea ligeramente diferente de la que resulta al ordenarlos por sus números atómicos.

Sin embargo, si esto fuera todo lo que hizo Mendeleiev, sin conocerse la existencia de protones y neutrones, que no se conocieron hasta varias décadas más tarde, su versión de la tabla

periódica habría sido probablemente rechazada sin contemplaciones, al igual que lo fueron las versiones de sus predecesores. Pero, con el fin de hacer que los elementos que tenían propiedades químicas similares coincidieran unos debajo de los otros en las columnas de su tabla, Mendeleiev había dejado también algunas casillas vacías en su tabla. Para 1871 tenía ya una versión mejorada de la tabla, en la que aparecía la totalidad de los 63 elementos que se conocían en aquella época, con unos pocos ajustes, como el intercambio de lugares entre el telurio y el yodo, y con tres casillas vacías, que, según afirmó, correspondían a tres elementos que aún estaban sin descubrir. A partir de las propiedades de los elementos adyacentes a las casillas libres en las columnas de la tabla, Mendeleiev podía predecir con cierto detalle cuáles serían las propiedades de aquellos elementos desconocidos. Durante los quince años siguientes se logró descubrir los tres elementos necesarios para llenar los huecos de la tabla, y resultó que tenían exactamente las propiedades que Mendeleiev había predicho —se trataba del galio, descubierto en 1875; el escandio, que se conoció en 1879; y el germanio, que se descubrió en 1886—. Aunque la tabla periódica de Mendeleiev no consiguió inicialmente una aprobación universal y, de hecho, había recibido críticas por pretender interferir con la naturaleza cambiando el orden de los elementos, al llegar la década de 1890 no era ya posible poner en duda que la periodicidad —según la cual los elementos forman familias en las que dichos elementos tienen propiedades químicas similares y dentro de las cuales los pesos atómicos de los distintos elementos difieren en múltiplos de ocho veces el peso atómico del hidrógeno— era una verdad profunda con respecto a la naturaleza del mundo químico. Fue también un ejemplo clásico del modo en que funciona el método científico e indicaba el camino que habrían de seguir los científicos en el siglo XX. A partir de una masa de datos, Mendeleiev encontró una pauta que le llevó a

formular una predicción susceptible de ser comprobada experimentalmente; cuando los experimentos confirmaron su predicción, la hipótesis en que se había basado dicha predicción cobró fuerza.

Sin embargo, aunque pueda resultar muy sorprendente desde un punto de vista moderno, ni siquiera esto fue aceptado universalmente como prueba de que los átomos existen realmente en forma de pequeñas entidades consistentes que se combinan entre sí siguiendo unas pautas bien definidas. Pero, mientras los químicos habían seguido una línea de investigación con respecto a la estructura interna de la materia y habían llegado a conseguir unas pruebas que, como mínimo, apoyaban la hipótesis atómica, los físicos habían seguido un camino diferente que les llevó por fin a una prueba indiscutible de la existencia del átomo.

La ciencia de la termodinámica

El tema unificador dentro de esta línea de la física del siglo XIX fue el estudio de calor y el movimiento, que recibió el nombre de *termodinámica*. La termodinámica, por una parte, surgió de la Revolución Industrial, que proporcionó a los físicos diversos ejemplos del modo en que actúa el calor (como fue el caso de la máquina de vapor), induciéndoles a investigar qué era exactamente lo que sucedía en aquellas máquinas, y, por otra parte, constituyó una aportación retroalimentadora a la Revolución Industrial, ya que un mejor conocimiento científico de lo que sucedía posibilitó el diseño y la construcción de máquinas más eficientes. Al comienzo del siglo XIX, como ya hemos visto, no había consenso en cuanto a la naturaleza del calor y, tanto la hipótesis del calórico como la teoría según la cual el calor es una forma del movimiento, tuvieron sus adeptos. Hacia mediados de la década de 1820, la termodinámica estaba

empezando a ser reconocida como una disciplina científica, aunque este término no existió hasta que William Thomson lo acuñó en 1849, y a mediados de la década de 1860 se habían establecido ya las leyes y los principios básicos. Incluso entonces, faltaban todavía unos cuarenta años más para que las consecuencias de una pequeña parte de estos trabajos se utilizaran en la prueba definitiva de la existencia real de los átomos.

Los descubrimientos conceptuales que fueron la clave para llegar a una comprensión de la termodinámica incluían el concepto de energía, la constatación de que la energía se puede transformar de una forma a otra, pero no puede ser creada ni destruida, y la comprobación de que el trabajo es una forma de energía (como ya había sugerido claramente Rumford con su investigación sobre el calor producido por una taladradora). Es conveniente fechar los inicios de la termodinámica como ciencia a partir de la publicación, en 1824, de un libro cuyo autor fue el francés Sadi Carnot (1796-1832). En este libro, titulado *Réflexions sur la puissance motive du feu* (*Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*), Carnot analizó la eficiencia de las máquinas en cuanto a convertir el calor en trabajo (dando de paso una definición científica del concepto de trabajo), demostró que el trabajo se produce cuando el calor pasa de una temperatura más alta a otra más baja (de lo que se deducía una forma primitiva de la segunda ley de la termodinámica: la constatación de que el calor siempre fluye de un objeto más caliente a otro más frío, y nunca a la inversa) e incluso llegó a plantear la posibilidad de un motor de combustión interna. Por desgracia, Carnot murió de cólera a los 36 años de edad, y aunque sus cuadernos contenían más descubrimientos relacionados con esta teoría, en la época en que murió aún no habían sido publicados. Dada la causa de su muerte, la mayoría de los manuscritos fueron quemados, junto con sus efectos personales; sólo unas pocas páginas sobrevivieron y en ellas hay indicios de lo

que probablemente había conseguido descubrir. Sin embargo, fue Carnot el primero que constató claramente que el calor y el trabajo eran intercambiables, y el científico que calculó por primera vez cuánto trabajo (en términos de levantar un cierto peso recorriendo una distancia vertical) podía desarrollar una determinada cantidad de calor (igual al calor que pierde un gramo de agua cuando se enfría 1 °C). El libro de Carnot no tuvo mucha influencia en sus tiempos, pero fue mencionado en 1834 en una explicación sobre la obra de Carnot que aparece en un informe escrito por Emile Clapeyron (1799-1864). La obra de Carnot llegó a ser conocida a través de este informe y ejerció una clara influencia sobre la generación de físicos que llevó a cabo la revolución de la termodinámica, especialmente William Thomson y Rudolf Clausius.

Si la historia de Carnot parece complicada, el modo en que los físicos llegaron a conocer la naturaleza de la energía fue realmente tortuoso. La primera persona que realmente formuló el principio de la conservación de la energía y publicó un cálculo correcto que determinaba el equivalente mecánico del calor[9] fue un físico alemán, Julius Robert von Mayer (1814-1878), que llegó a sus conclusiones a partir de unos estudios sobre seres humanos, no sobre máquinas de vapor, pero este personaje fue ampliamente ignorado, o como mínimo infravalorado, en sus tiempos, principalmente como consecuencia de haber llegado a ello por el camino «equivocado», al menos según la opinión de los físicos. En 1840, Mayer, con su título universitario recién obtenido, estaba trabajando como médico en un barco holandés que llegó hasta las Indias Orientales. En aquella época la sangría era un método que todavía se utilizaba ampliamente, no sólo para aliviar (supuestamente) los síntomas de las enfermedades, sino como algo rutinario en los trópicos, donde, según se creía, la extracción de un poco de sangre ayudaba a soportar el calor. Mayer conocía bien los tra-

bajos de Lavoisier que explicaban cómo los animales de sangre caliente mantenían su temperatura gracias a una combustión lenta de los alimentos mediante oxígeno dentro del cuerpo, haciendo los alimentos el papel de combustible; sabía que la sangre roja clara era transportada por todo el cuerpo desde los pulmones y a través de las arterias, mientras que la sangre de color oscuro, deficiente en oxígeno, es transportada de vuelta a los pulmones a través de las venas. Así, cuando Mayer abrió la vena de un marinero de Java, se quedó asombrado al descubrir que su color era claro, como el de la sangre arterial normal. Comprobó que sucedía lo mismo con la sangre venosa del resto de la tripulación y con la suya propia. Es seguro que muchos otros médicos tenían que haber visto lo mismo con anterioridad, pero Mayer, que tenía en torno a los 25 años y había obtenido su título recientemente, fue el único que tuvo la agudeza suficiente para comprender lo que estaba pasando. Mayer se dio cuenta de que la razón por la que la sangre venosa circulaba con una extraordinaria riqueza en oxígeno era que en el calor de los trópicos el cuerpo tenía que quemar menos combustible, y por lo tanto no necesitaba consumir tanto oxígeno, para mantener el cuerpo caliente. Se percató de que esto implicaba que todas las formas de calor y energía son intercambiables — el calor del esfuerzo muscular, el calor del Sol, el calor obtenido quemando carbón, o cualquier otro— y que el calor, o la energía, nunca se podía crear, sino sólo cambiar de una forma a otra.

Mayer regresó a Alemania en 1841 y ejerció allí la medicina. Sin embargo, al mismo tiempo que trabajaba como médico, fue desarrollando su interés por la física, leyendo mucho, y a partir de 1842 publicó sus primeros informes científicos llamando la atención (o intentando llamar la atención) sobre estas teorías. En 1848 desarrolló sus teorías sobre el calor y la energía para llegar a una valoración, que comentaremos brevemente, de la

edad de la Tierra y del Sol. Sin embargo, toda su obra pasó desapercibida entre los físicos y Mayer se deprimió tanto por esta falta de reconocimiento que llegó a intentar suicidarse en 1850, siendo posteriormente confinado en varias instituciones para enfermos mentales durante la década de 1850. Sin embargo, a partir de 1858, Hermann von Helmholtz (1821-1894), Clausius y John Tyndall (1820-1893) redescubrieron su obra y le dieron la credibilidad que merecía. Mayer recobró su salud y fue premiado con la medalla Copley de la Royal Society en 1871, siete años antes de su muerte.

Estudios de James Joule sobre termodinámica

El primer físico que abordó realmente el concepto de energía (aparte del infortunado Carnot, cuya obra se perdió casi completamente) fue James Joule (1818-1889), que nació en Salford, cerca de Manchester, siendo hijo del rico propietario de una fábrica de cerveza. Dado que provenía de una familia dotada de medios propios, Joule no tuvo que preocuparse de trabajar para ganarse la vida, pero, siendo aún adolescente, pasó un cierto tiempo trabajando en la fábrica de cerveza, de la que se suponía que iba a heredar una parte. Su experiencia directa con el funcionamiento de la maquinaria pudo desencadenar su interés por el calor, al igual que los gases producidos en la fermentación habían contribuido a inspirar la obra de Priestley. El caso es que el padre de Joule vendió la fábrica de cerveza en 1854, cuando James tenía 35 años, por lo que éste nunca la heredó. Joule estudió con preceptores, hasta que, en 1834, el padre envió a James y a su hermano mayor a estudiar química con John Dalton. Dalton tenía por aquel entonces 68 años y un estado de salud precario, pero seguía dando clases particulares; sin embargo, los muchachos aprendieron muy poca química en estas clases, porque Dalton insistía en enseñarles primero la

obra de Euclides, lo cual le llevó dos años a un ritmo de dos horas repartidas durante la semana, y luego, en 1837, dejó de enseñar a causa de su enfermedad. Pero Joule conservó una relación amistosa con Dalton, al que visitaba de vez en cuando para tomar el té, hasta que Dalton falleció en 1844. En 1838, Joule reformó una de las habitaciones de la casa familiar para convertirla en un laboratorio donde trabajó de manera independiente. Era también un miembro activo de la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester, donde solía sentarse junto a Dalton en las conferencias (incluso antes de ser miembro de aquella sociedad). De esta manera, estaba siempre al tanto de lo que sucedía en el mundo científico en el sentido más amplio.

Los primeros trabajos de Joule se centraron en el electromagnetismo, con la idea de inventar un motor eléctrico que fuera más potente y eficiente que las máquinas de vapor que se utilizaban por aquel entonces. Los intentos fueron infructuosos, pero le llevaron a realizar una investigación sobre la naturaleza del trabajo y de la energía. En 1841 escribió para el *Philosophical Magazine* y la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester sendos trabajos sobre la relación existente entre la electricidad y el calor (una versión anterior de esta obra había sido rechazada por la Royal Society, aunque le publicaron un breve extracto en el que se resumían las ideas principales). En 1842 presentó sus teorías en la reunión anual de la British Association for the Advancement of Science (BA), un acontecimiento peripatético que aquel año se celebró precisamente en Manchester. Entonces tenía tan sólo 23 años de edad. Durante los años siguientes, Joule realizó su trabajo más importante, a lo largo del cual llevó a cabo el clásico experimento de demostrar que el trabajo se convierte en calor agitando el agua de un contenedor mediante una rueda con paletas y midiendo el aumento de la temperatura. Pero este trabajo se dio a conocer de una forma un tanto extraña. En 1847 dio dos conferencias en Man-

chester, en las que, entre otras cosas, habló sobre la ley de la conservación de la energía y su importancia en el mundo de la física. Por lo que Joule había podido saber, desde luego nadie había hecho algo parecido con anterioridad. Ansioso por ver sus teorías publicadas, Joule organizó con ayuda de su hermano la publicación de la versión íntegra de sus conferencias en un periódico, el *Manchester Courier*, ante la sorpresa de los lectores habituales de este medio y sin comunicar la noticia a la comunidad científica. Sin embargo, aquel año, más tarde, la BA celebró su reunión en Oxford y allí Joule ofreció un resumen de sus ideas. Un joven que se encontraba entre la audiencia, William Thomson (que entonces tenía 22 años) captó inmediatamente la importancia de estas teorías. Joule y Thomson se hicieron amigos y colaboraron mutuamente en los trabajos sobre la teoría de los gases y particularmente sobre el modo en que éstos se enfrían al expandirse: es el principio según el cual funcionan las máquinas refrigeradoras y se conoce como efecto Joule-Thomson. Desde el punto de vista de la hipótesis atómica, en 1848 Joule publicó otro trabajo importante, en el que calculaba la velocidad media a la que se mueven las moléculas de un gas. Considerando que el hidrógeno está formado por partículas diminutas que saltan chocando entre sí y contra las paredes del recipiente que contenga al gas, a partir del peso de cada partícula y de la presión ejercida por el gas, calculó que, a una temperatura de 60 °F (unos 15,5 °C), y una presión correspondiente a 30 pulgadas (76,2 cm) de mercurio —más o menos las condiciones de una habitación con un ambiente confortable—, las partículas del gas debían moverse a una velocidad de 6225,54 pies por segundo (aproximadamente 1897,54 metros por segundo). Dado que las moléculas de oxígeno pesan dieciséis veces el peso de las moléculas de hidrógeno, y que la fórmula adecuada implica multiplicar por uno partido por la raíz cuadrada de la masa, en el aire ordinario y en las mismas con-

diciones las moléculas de oxígeno se mueven a un cuarto de la velocidad de las de hidrógeno, es decir a 1556,39 pies por segundo (unos 474,39 metros por segundo). Los trabajos de Joule sobre la dinámica de gases y, especialmente, sobre la ley de la conservación de la energía, recibieron un amplio reconocimiento a finales de la década de 1840, llegando incluso a leer un informe crucial sobre el tema ante la Royal Society en 1849 —lo que sin duda le compensó en gran medida por el rechazo de que había sido objeto su informe anterior— y en 1850 fue elegido miembro de dicha institución. Tenía ya algo más de treinta años y, como sucede a menudo, durante el resto de su vida no volvió a lograr nada que igualara en importancia a sus trabajos iniciales. Así pues, la antorcha pasó a Thomson, James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann.

William Thomson (lord Kelvin) y las leyes de la termodinámica

Joule había nacido con una cucharilla de plata en la boca y, en consecuencia, nunca trabajó en un ambiente universitario. En cambio, Thomson nació con otro tipo de cucharilla de plata en su boca, por lo que se pasó casi toda su vida en entornos universitarios. Cuando William nació, el 26 de junio de 1824, su padre, James Thomson, era catedrático de matemáticas en la Royal Academical Institution de Belfast (la institución precursora de la Universidad de Belfast). William Thomson tuvo varios hermanos, pero su madre murió cuando él tenía 6 años. William y su hermano James (1822-1892), que también llegó a ser físico, fueron educados en casa por su padre y, cuando éste consiguió la plaza de catedrático de matemáticas en la Universidad de Glasgow, en 1832, a los dos muchachos se les permitió asistir allí a clases magistrales y se matricularon oficialmente en la universidad en 1834, cuando William tenía 10 años —

aunque no con la intención de que obtuviera una licenciatura, sino más bien para regularizar el hecho de que estuviera asistiendo a las clases—. William se trasladó a la Universidad de Cambridge en 1841 y se licenció en 1845, habiendo obtenido ya varios premios por sus ensayos científicos y después de haber publicado ya una serie de trabajos en el *Cambridge Mathematical Journal*. Después de conseguir la licenciatura, William trabajó durante algún tiempo en París, donde se familiarizó con la obra de Carnot, pero el mayor anhelo de su padre era que aquel hijo tan brillante se reuniera con él entrando a trabajar también en la Universidad de Glasgow: en 1846, cuando el catedrático de filosofía natural de esta universidad falleció (no de manera inesperada, puesto que era un anciano), el catedrático de matemáticas ya había iniciado una campaña, que finalmente tuvo éxito, con el propósito de conseguir que su hijo William fuera elegido para ocupar la plaza. Sin embargo, James Thomson no vivió mucho para disfrutar de la nueva situación, ya que murió de cólera en 1849. William Thomson siguió siendo catedrático de filosofía natural en Glasgow desde 1846 (cuando tenía 22 años) hasta que se jubiló, a los 75 años, en 1899; después de jubilarse, se matriculó como estudiante de investigación en la universidad para no perder la práctica, con lo que, después de haber sido en su infancia el estudiante más joven que hubo en aquella universidad, logró llegar a ser también el más viejo que había asistido nunca a la Universidad de Glasgow. Falleció en Largs, Ayrshire, el 17 de diciembre de 1907 y fue enterrado cerca de Isaac Newton en la abadía de Westminster.

La fama de Thomson y el honor de poder descansar para siempre en un lugar tan especial no se debieron únicamente a sus logros científicos. Su mayor impacto en la Gran Bretaña victoriana lo consiguió por su vinculación con la tecnología aplicada. Fue responsable del éxito del primer cable telegráfico que funcionó a través del océano Atlántico (después de que dos

intentos previos fracasaran por no contar con el beneficio de su gran pericia) e hizo una gran fortuna con sus patentes de distintos inventos. En gran medida por su éxito con el cable transatlántico, que en aquellos tiempos fue tan importante como Internet a principios del siglo XXI, Thomson recibió el título de sir en 1866, y por ser una lumbrera que guiaba el progreso industrial fue nombrado barón Kelvin de Largs en 1892, tomando este nombre del pequeño río que atraviesa el emplazamiento de la Universidad de Glasgow. Aunque este nombramiento llegó mucho después de que hubiera realizado su importante obra científica, en los círculos científicos se suele mencionar a Thomson llamándole lord Kelvin, o sencillamente Kelvin, en parte para distinguirle del físico J. J. Thomson, con el que no le unía ninguna relación de parentesco. La escala de temperatura absoluta o termodinámica se llama escala Kelvin en su honor.

Aunque también trabajó en otros campos (incluidos el magnetismo y la electricidad, de los que hablaremos en el próximo capítulo), el trabajo más importante de Thomson consistió de hecho en hacer que la termodinámica llegara a ser una disciplina científica en la segunda mitad del siglo XIX. Arrancando en gran medida de la obra de Carnot, ya en 1848 Thomson creó la escala absoluta de temperaturas, que está basada en la idea de que el calor es equivalente al trabajo y que un cierto cambio en la temperatura corresponde a una cierta cantidad de trabajo. Esto define la escala absoluta y además trae consigo como consecuencia que existe una temperatura mínima posible (–273 °C, escrita en esta escala como 0 K) a la que no se puede realizar más trabajo porque a esta temperatura no se puede extraer más calor del sistema. Por aquella época, en Alemania, Rudolf Clausius (1822-1888) estaba puliendo y desarrollando las teorías de Carnot (ciertamente, la obra de Carnot necesitaba una revisión, ya que, entre otras cosas, éste había utilizado el concepto de ca-

lórico). Thomson supo de los trabajos de Clausius a principios de la década de 1850, cuando ya estaba trabajando en una línea similar. Ambos llegaron, más o menos independientemente, a los principios clave de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica, como muchos ya saben, dice sencillamente que el calor es trabajo, y esta ley proporciona una visión intrigante del modo en que la ciencia del siglo XIX, durante la década de 1850, llegó a la conclusión de que era necesario entenderla como una ley de la naturaleza. La segunda ley de la termodinámica es en realidad mucho más importante, posiblemente la ley más importante y fundamental de toda la ciencia. En una de sus formulaciones dice que el calor no puede por sí mismo pasar de un objeto más frío a otro más caliente. Dicho así, esto resulta obvio e inocuo. Si se pone un cubo de hielo en una jarra de agua caliente, el calor fluye del agua caliente al frío hielo y lo derrite; nunca fluye del hielo al agua, haciendo que el hielo se quede más frío y el agua se ponga más caliente. Si se enuncia de una manera más gráfica, la importancia universal de la segunda ley resulta más evidente. Esta ley dice que las cosas se desgastan —«todo» se desgasta, incluido el propio universo—. Desde otro punto de vista, la cantidad de desorden que hay en el universo —que se puede medir matemáticamente mediante una cantidad que Clausius llamó «entropía»— siempre aumenta globalmente. El orden sólo puede mantenerse o incrementarse en zonas limitadas, como la Tierra, donde existe un flujo de energía procedente del exterior (en este caso, del Sol) gracias al cual se puede vivir. Pero es una ley de la naturaleza que la disminución de la entropía que produce la vida en la Tierra al alimentarse del Sol es menor que el aumento de entropía que va asociado a los procesos que mantienen al Sol con su brillo, sean cuales sean esos procesos. Esto no puede continuar eternamente, ya que el suministro de energía procedente del Sol no es inagotable. Fue esta constatación

la que indujo a Thomson a escribir, en un informe publicado en 1852, lo siguiente:

> La Tierra debe de haber existido durante un período de tiempo finito en el pasado, y una vez transcurrido un período finito en el futuro la Tierra deberá ser de nuevo un lugar inadecuado para que el hombre la habite tal como está constituido en el momento actual, a menos que se hayan realizado o se vayan a realizar unas operaciones que son imposibles si imperan las leyes a las que se encuentran sometidas las operaciones conocidas que se están realizando actualmente en el mundo material.

Este fue el primer reconocimiento científico real de que la Tierra (y, por consiguiente, el universo) tiene un momento definido en el que comienza a existir y que se podría datar aplicando principios científicos. Cuando el propio Thomson aplicó principios científicos a este problema, consiguió averiguar la edad del Sol calculando durante cuánto tiempo podría generar calor al ritmo de producción actual mediante el proceso más eficiente que se conocía en aquella época, es decir, contrayéndose bajo su propio peso, convirtiendo gradualmente la energía gravitatoria en calor. La respuesta resultó ser unas cuantas decenas de años —una extensión de tiempo mucho menor que la establecida por los geólogos en la década de 1850 y que pronto sería reconocida por los evolucionistas—. Por supuesto, la solución del rompecabezas llegó con el descubrimiento de la radioactividad y luego con los trabajos de Albert Einstein, concretamente con la demostración de que la materia es una forma de energía, incluyendo su famosa fórmula $E = mc^2$. Todo esto lo comentaremos en próximos capítulos, pero el conflicto entre, por una parte, las extensiones temporales de los geólogos y los evolucionistas y, por otra parte, las extensiones planteadas por los físicos de la época estuvo retumbando durante toda la segunda mitad del siglo XIX.

Estos trabajos hicieron también que surgiera un conflicto entre Thomson y Hermann von Helmholtz (1821-1894), que llegó a unas conclusiones similares con independencia de los

hallazgos de Thomson. Hubo una riña poco edificante entre los defensores de ambos a causa de la prioridad, careciendo de sentido la discusión, ya que no sólo el infortunado Mayer sino también el aún más infortunado John Waterston habían sido los primeros. Waterston (1811-1883?) era escocés, nacido en Edimburgo, y trabajó en Inglaterra como ingeniero civil en los ferrocarriles, antes de trasladarse a la India en 1839 para enseñar a los hijos más pequeños de los que trabajaban en la Compañía de las Indias Orientales. Ahorró lo suficiente para jubilarse a una temprana edad, en 1857, y regresó a Edimburgo para dedicar su tiempo a investigar en la disciplina que pronto se llamaría termodinámica y en otras áreas de la física. Pero llevaba ya muchos años dedicándose a la ciencia en su tiempo libre y en 1845 había escrito un informe en el que explicaba cómo se distribuye la energía entre los átomos y las moléculas de un gas según unas reglas estadísticas —no es que todas las moléculas tengan la misma velocidad, sino que hay toda una gama de velocidades distribuidas según reglas estadísticas en torno a la velocidad media. En 1845, envió desde la India a la Royal Society un informe en el que explicaba este trabajo, pero dicha institución no sólo rechazó el informe, sino que al cabo de poco tiempo lo había perdido (los miembros de la comisión encargada de valorarlo no lo entendieron y en consecuencia lo descartaron, considerándolo un disparate). En este informe aparecían cálculos relativos a las propiedades de los gases (tales como sus calores específicos) basados en estas teorías, y eran esencialmente correctos, pero Waterston no se había preocupado de guardar una copia y nunca lo volvió a escribir, aunque, tras regresar a Inglaterra, publicó informes parecidos (que fueron ampliamente ignorados). Además, adelantándose a Thomson y Von Helmholtz, pero casi al mismo tiempo que Mayer, tuvo la misma idea sobre el modo en que el calor necesario para mantener caliente el Sol podría generarse en procesos gravitatorios. Dado

que ninguno de sus trabajos obtenía el reconocimiento debido, al igual que Mayer, Waterston enfermó y cayó en la depresión. El 18 de junio de 1883, salió de su casa y nunca regresó. Aunque en esta historia hay algo así como un final feliz: en 1891, el manuscrito perdido de Waterston apareció en los sótanos de la Royal Society y se publicó en 1892.

JAMES CLERK MAXWELL Y LUDWIG BOLTZMANN: LA TEORÍA CINÉTICA Y EL RECORRIDO LIBRE MEDIO DE LAS MOLÉCULAS

Para entonces, hacía tiempo que se habían desarrollado la teoría cinética de los gases (la teoría que trata de los gases considerando el movimiento de sus átomos y sus moléculas) y las teorías de la mecánica estadística (que aplican reglas estadísticas para explicar el comportamiento de los conjuntos de átomos y moléculas). Las dos figuras clave en el desarrollo de estas teorías fueron James Clerk Maxwell (que aparecerá en otro contexto en el próximo capítulo) y Ludwig Boltzmann (1844-1906). Después de que Joule hubo calculado las velocidades a las que se mueven las moléculas en un gas, Clausius introdujo la idea de recorrido libre medio.[10] Obviamente las moléculas no se desplazan sin desviaciones a las velocidades que Joule había calculado; las moléculas chocan una y otra vez entre sí y saltan en distintas direcciones. El recorrido libre medio es la distancia media que recorre la molécula entre dos choques sucesivos con otras partículas y es un valor muy pequeño. En la reunión anual de la BA de 1859, celebrada aquel año en Aberdeen, Maxwell presentó un informe que se hacía eco, aunque no lo conociera, de buena parte de los materiales contenidos en el informe perdido de Waterston. Esta vez, el mundo científico estaba preparado para aguzar el oído y centrar su atención en el tema. Maxwell demostró que las velocidades de las partículas de un gas se distribuían en torno a la velocidad media, calculó

la velocidad media de las moléculas contenidas en el aire a 60 °F [15,5 °C], dando como valor 1505 pies [unos 458,72 m] por segundo, y además determinó que el recorrido libre medio de dichas moléculas era 1/447 000 de pulgada [1/447 000 de 2,54 cm o aproximadamente 1/175 984 de centímetro]. En otras palabras, cada molécula experimenta 8.077 200 000 choques por segundo —más de ocho mil millones de choques por segundo—. Precisamente por lo corto que es el recorrido libre medio y lo enorme que es la frecuencia de los choques se tiene la impresión de que un gas es un fluido liso y continuo, cuando en realidad está formado por un gran número de partículas diminutas en movimiento constante, y sin que haya cosa alguna entre las partículas. Aún más significativo es el hecho de que fuera precisamente este trabajo el que condujo a un conocimiento total de la relación existente entre calor y movimiento —la temperatura de un objeto es una medida de la velocidad media a la que se están moviendo los átomos y las molécula que constituyen dicho objeto— y que se abandonara por fin el concepto de calórico.

Maxwell siguió desarrollando estas teorías durante la década de 1860, aplicándolas para explicar muchas de las propiedades observadas en los gases, tales como su viscosidad y, como ya hemos visto, el modo en que se enfrían cuando expanden su volumen (lo que resulta ser debido a que los átomos y las moléculas contenidas en un gas se atraen entre sí ligeramente, por lo que se ha de realizar un trabajo para superar esta atracción cuando el gas se expande, frenando el movimiento de estas partículas y haciendo por consiguiente que el gas se quede más frío). El austríaco Ludwig Boltzmann asumió las teorías de Maxwell, para pulirlas y perfeccionarlas; a su vez, en un intercambio constructivo, Maxwell utilizó algunas de las teorías de Boltzmann para continuar con el perfeccionamiento de la teoría cinética. Uno de los resultados de este intercambio es que la re-

gla estadística que describe la distribución de las velocidades (o energías cinéticas) de las moléculas de un gas en torno a su velocidad media se conoce actualmente como distribución de Maxwell-Boltzmann.

Boltzmann realizó otras muchas contribuciones importantes a la ciencia, pero su aportación principal fue la que realizó en el campo de la mecánica estadística, donde las propiedades globales de la materia (incluida la segunda ley de la termodinámica) se deducen considerando las propiedades combinadas de los átomos y las moléculas que la constituyen, unas propiedades que obedecen a sencillas leyes de la física, esencialmente las leyes de Newton, y la acción ciega del azar. En aquel momento se consideraba que dichas propiedades globales dependían de los conceptos de átomos y moléculas, y siempre se pensó de este modo en el mundo anglohablante, donde la mecánica estadística se desarrolló hasta su pleno florecimiento gracias a los trabajos del estadounidense Willard Gibbs (1839-1903) —precisamente el primer estadounidense (dado que Rumford se consideraba a sí mismo como inglés) que realizó una contribución significativa a la ciencia. Sin embargo, incluso a finales del siglo XIX, estas ideas eran todavía muy criticadas por los filósofos antiatomistas en el ámbito de lengua alemana, y hubo científicos, como Wilhelm Ostwald (1853-1932), que insistieron, incluso en el siglo XX, en que los átomos eran un concepto hipotético, tan sólo un instrumento heurístico del que nos podríamos valer para explicar las propiedades observadas en los elementos químicos. Boltzmann, que por cierto sufría de depresiones, llegó a estar convencido de que su trabajo nunca recibiría el reconocimiento que merecía. En 1898, publicó un informe en el que detallaba sus cálculos, con la esperanza expresa de «que, cuando la teoría de los gases reviva de nuevo, no habrá demasiadas cosas que tengan que ser redescubiertas». Poco después, en 1900, realizó un intento fallido por acabar con su

propia vida, aunque probablemente no fue el único, por lo cual su informe puede considerarse como una especie de nota de suicidio en lenguaje científico. Parece ser que recuperó el ánimo durante cierto tiempo y viajó a Estados Unidos en 1904, donde impartió conferencias en el World's Fair de San Luis y visitó la Universidad de California, concretamente el campus de Berkeley y el de Stanford, donde se comentó su extraño comportamiento consistente en «una mezcla de éxtasis maníaco con la afectación más bien pretenciosa de un famoso profesor alemán».[11] Sin embargo, la mejoría mental, si se puede considerar mejoría este comportamiento, no fue duradera, ya que Boltzmann se ahorcó durante unas vacaciones familiares en Duino, cerca de Trieste, el 5 de septiembre de 1906. Ironías de la vida, lo que no sabía Boltzmann era que la obra que finalmente convencería a los dubitativos, como Ostwald, sobre la realidad de los átomos se había publicado el año anterior.

ALBERT EINSTEIN: EL NÚMERO DE AVOGADRO, EL MOVIMIENTO BROWNIANO Y POR QUÉ EL CIELO ES AZUL

El autor de la mencionada obra fue el más famoso empleado de una oficina de patentes que ha existido en la historia: Albert Einstein. Explicaremos brevemente cómo llegó a ser empleado de una oficina de patentes, pero lo que aquí puede resultar verdaderamente importante es que, a principios de la década de 1900, Einstein era un joven científico brillante (tenía 26 años en 1905) que realizaba sus trabajos con independencia de la comunidad académica tradicional y que estaba obsesionado con la idea de demostrar que los átomos eran reales. Como escribió más tarde en sus *Autobiographical Notes*[12] (*Notas autobiográficas)*, en aquella época su interés se centraba en la búsqueda de pruebas «que garantizarían, en la medida de lo posible, la existencia de átomos de un tamaño finito definido». Einstein llevó

a cabo esta investigación en el contexto de los trabajos que realizó cuando intentaba conseguir el doctorado, una titulación que a comienzos del siglo XX era un requisito imprescindible para cualquiera que deseara hacer carrera en la investigación dentro del ámbito universitario. Einstein había obtenido en 1900 un diploma de la Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH: el equivalente a una escuela politécnica en la Confederación Helvética), pero, aunque había realizado adecuadamente sus exámenes finales, su actitud no le granjeó las simpatías de los profesores de la ETH (uno de sus tutores, Hermann Minkowski (1864-1909) describió al joven Albert Einstein como «un vago redomado» que «nunca se preocupó lo más mínimo por aprender matemáticas»), y Einstein fue incapaz de conseguir un empleo como ayudante de alguno los profesores de la ETH, así como de obtener buenas referencias de dichos profesores para optar a un puesto académico. En consecuencia, tuvo diversos empleos temporales y a tiempo parcial antes de entrar a trabajar en la Oficina Federal de Patentes ubicada en Berna, donde comenzó su actividad laboral en 1902. Dedicaba gran parte de su tiempo a intentar resolver problemas científicos (no sólo su tiempo libre, si no también tiempo de oficina que tendría que haber dedicado a trabajar en las aplicaciones de las patentes) y publicó varios trabajos entre 1900 y 1905. Pero su proyecto más importante era obtener el doctorado para conseguir que le volvieran a abrir las puertas de las instituciones académicas. La ETH no concedía por sí misma títulos de doctorado, pero existía un convenio en virtud del cual los licenciados de la ETH podían presentar una tesis doctoral en la Universidad de Zurich y éste es el camino que siguió Einstein. Después de un intento fallido con un trabajo que finalmente decidió no presentar, en 1905 estuvo ya preparado para optar al doctorado con un trabajo que resultaría plenamente satisfactorio según los criterios de los examinadores de

Zurich:[13] se trataba del primero de los dos trabajos en los que Einstein demostraba la existencia real de los átomos y las moléculas más allá de toda duda razonable.

Los científicos que aceptaban la teoría de los átomos habían encontrado ya varios procedimientos toscos y directos para calcular las medidas de estas pequeñas partículas, unos procedimientos que se remontan a los trabajos realizados en 1816 por Thomas Young (del cual hablaremos con más detalle en el capítulo 11). Young desarrolló un método para calcular las dimensiones de las moléculas de agua a partir del estudio de la tensión superficial de un líquido —la elasticidad de la superficie del agua contenida en un vaso, que es lo que permite que una aguja de acero «flote» sobre dicha superficie, si la depositamos allí con sumo cuidado—. La tensión superficial se explica en relación con las moléculas del líquido porque dichas moléculas se atraen entre sí —por decirlo de alguna manera, son pegajosas. En el centro del líquido la atracción se ejerce uniformemente en todas las direcciones, pero las moléculas de la superficie no tienen por encima moléculas vecinas que ejerzan una atracción hacia arriba, por lo que la atracción a la que están sometidas tira de ellas sólo lateralmente y hacia abajo, cohesionándolas en una capa elástica que constituye la superficie del líquido. Young hizo un razonamiento consistente en decir que la fuerza de la tensión resultante debe relacionarse con la magnitud de la fuerza de atracción, que, a primera vista, se podría considerar equivalente a la magnitud del tamaño de las moléculas. A partir de las mediciones de la tensión superficial, calculó que el tamaño de lo que él llamaba «partículas de agua» debía estar «entre dos mil y diez mil millonésimas de pulgada», lo cual corresponde a un valor comprendido entre 5000 y 25 000 millonésimas de centímetro, tan sólo unas diez veces mayor que las estimaciones actuales. Fue un logro impresionante que se produjo justo un año después de la batalla de Wa-

terloo, pero la medición no fue lo bastante precisa o convincente para persuadir a los que dudaban.

Durante la segunda mitad del siglo XIX se realizaron varias estimaciones más precisas, pero basta con que citemos una como ejemplo. A mediados de la década de 1860, el químico austríaco Johann Loschmidt[14] utilizó una técnica que en principio resulta sorprendentemente sencilla. Afirmó que en un líquido todas las moléculas están en contacto con sus vecinas, sin que haya espacio vacío entre ellas, por lo que el volumen de un líquido sería igual a la suma de los volúmenes de todas sus moléculas. Cuando esa misma cantidad de líquido se vaporiza convirtiéndose en un gas, el volumen de cada una de las moléculas sigue siendo el mismo, pero aparecen entonces espacios vacíos entre ellas. A partir de cálculos del recorrido libre medio, relacionados con la presión medible del gas y con el número de Avogadro, consiguió un modo independiente de averiguar qué parte del gas era realmente espacio vacío. Aunque este método resultaba incluso elegante, la dificultad que se planteaba en la década de 1860 estaba en que era preciso licuar gases como el nitrógeno y que las densidades de estos líquidos (el volumen de una masa dada) tenían que calcularse de diversas maneras. Incluso así, combinando las dos series de cálculos, Loschmidt consiguió hacer una estimación del tamaño de las moléculas contenidas en el aire (unas pocas millonésimas de milímetro) y un valor del número de Avogadro que era aproximadamente $0{,}5 \times 10^{23}$ (o un cinco seguido de veintidós ceros). También definió otro número importante para el estudio de los gases y relacionado con el número de Avogadro —el número de moléculas existentes en un metro cúbico de gas en condiciones normales de presión y temperatura, que actualmente se conoce como el número de Loschmidt y según las mediciones modernas es $2{,}686\,763 \times 10^{25}$.

Sin embargo, el modo en que Einstein abordó en su tesis doctoral el problema de determinar los tamaños de las moléculas no utilizaba gases, sino soluciones —concretamente soluciones de azúcar en agua—. También utilizó los conocimientos de termodinámica que los científicos habían ido adquiriendo durante la segunda mitad del siglo XIX. Resulta al principio bastante sorprendente, aunque no por eso deja de ser cierto, el hecho de que las moléculas de una solución se comporten en cierto modo de una forma muy parecida a las moléculas de un gas. El modo en que Einstein hizo uso de este hecho incluye un fenómeno conocido como osmosis. Imaginemos un recipiente que está lleno de agua hasta la mitad y dividido en dos zonas por una barrera con unos orificios lo suficientemente grandes para que las moléculas de agua puedan atravesarla. Por término medio, será el mismo el número de moléculas que atraviese la barrera en ambos sentidos cada segundo, por lo que el nivel del líquido seguirá siendo también el mismo en las dos mitades del recipiente. A continuación se pone azúcar en una de las mitades del recipiente, haciendo así una solución. Dado que las moléculas del azúcar son mucho mayores que las moléculas del agua, no pueden atravesar la membrana semipermeable, que es como se llama a la barrera. ¿Qué le sucede al nivel del líquido a cada lado de la membrana? La primera vez que se enfrentan con este problema, la mayoría de las personas suele pensar que la presencia del azúcar aumenta la presión en ese lado de la barrera, impulsando más moléculas de agua y haciendo que el nivel aumente en el lado en que no hay azúcar. En realidad sucede lo contrario, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

El enunciado de la segunda ley en su versión sencilla, es decir, que el calor fluye siempre de un objeto más caliente a otro más frío, es un ejemplo concreto de la tendencia que tienen todas las diferencias existentes en el universo a compensarse, lo

cual es la razón por la que las cosas se van desgastando o acabando. Por ejemplo, el calor fluye desde las estrellas calientes al frío del espacio en un intento de nivelar la temperatura de todo el universo. Un sistema en el que existe una pauta clara (o incluso una pauta indefinida) tiene más orden, y por consiguiente menos entropía, que un sistema que carece totalmente de pautas (un tablero de ajedrez en blanco y negro tiene una entropía menor que la de un tablero similar pintado en un tono gris uniforme). Se podría expresar la segunda ley diciendo que «la naturaleza aborrece las diferencias». En este sentido, en el ejemplo que acabamos de mencionar, el agua atraviesa la membrana para «entrar en» la disolución, diluyendo la fuerza de la disolución de azúcar y haciéndola ser menos diferente del agua pura que queda al otro lado de la barrera. El hecho es que el nivel del líquido «asciende» en el lado de la barrera donde está el azúcar, y «desciende» donde sólo hay agua pura. Este proceso continúa hasta que el exceso de presión debido a la diferencia de altura entre la disolución que está a un lado de la barrera y el agua que está al otro lado es suficientemente grande como para contrarrestar la presión del agua que intenta pasar a través de la membrana (la presión osmótica). Por consiguiente, la presión osmótica se puede determinar sencillamente midiendo la diferencia de altura una vez que el sistema se ha quedado estacionario. La presión osmótica, por su parte, depende del número de moléculas de la sustancia disuelta (en este caso el azúcar) que haya dentro de la disolución: cuanto más concentrada sea ésta, mayor es la presión. El tamaño de las moléculas se introduce en el cálculo en términos de la fracción del volumen de la solución que ocupan realmente dichas moléculas. Y, una vez más, interviene en la historia el recorrido libre medio de las moléculas, mediante su relación con la velocidad a la cual se difunden las moléculas a través de la membrana. Juntando todo esto, Einstein calculó en su tesis (que fue publicada en una versión ligera-

mente revisada en 1906) que el número de Avogadro era $2{,}1 \times 10^{23}$ y que el diámetro de las moléculas de agua debía ser de unos pocos cientos de millonésimas de centímetro. En la versión publicada en 1906, con nuevos datos obtenidos en experimentos más precisos, Einstein ajustó el valor del número de Avogadro, aumentando su valor hasta $4{,}15 \times 10^{23}$ y en 1911 las cifras que dio fueron $6{,}6 \times 10^{23}$ —pero, para entonces, unos experimentos que partían de otro importante informe de Einstein ya habían aproximado el número de Avogadro con una precisión considerable.[15]

Este segundo trabajo, que tenía como objetivo aportar pruebas «que garantizaran, en la medida de lo posible, la existencia de átomos de un tamaño finito determinado», quedó terminado y fue publicado en 1905. Proporcionaba una imagen física mucho más sencilla para entender de qué trataba la cuestión, y ésta fue una de las razones por las que se convirtió en la prueba decisiva que finalmente convenció a los últimos escépticos de que los átomos eran una realidad. Al mismo tiempo introdujo también técnicas estadísticas que iban a tener una importancia profunda en muchas áreas de la física durante las décadas siguientes.

Este trabajo clásico de Einstein trataba sobre el fenómeno conocido como movimiento browniano —aunque Einstein no lo comenzó con la intención de explicar el movimiento browniano, sino que más bien desarrollaba, a partir de principios fundamentales (su planteamiento habitual para abordar cualquier problema), el modo en que la existencia de los átomos y las moléculas podría perfilarse a una escala lo suficientemente grande como para que pudiera verse, y «luego» sugería que lo que había descrito podría corresponder a aquel fenómeno ya conocido—. Dejó clara su postura en el párrafo inicial del trabajo:

> En este informe se demostrará que, de acuerdo con la teoría cinético-molecular del calor, los cuerpos de tamaño microscópicamente visible suspendidos en líquidos deben realizar, como resultado de movimientos moleculares térmicos, unos movimientos de tal magnitud que puedan ser fácilmente observables mediante un microscopio. Es posible que los movimientos que aquí se estudien sean idénticos a lo que se llama movimiento molecular browniano; sin embargo, los datos de que dispongo sobre este último son tan imprecisos que no podría formar un juicio al respecto.[16]

El movimiento browniano toma su nombre del botánico escocés Robert Brown (1773-1858), que observó este fenómeno mientras estudiaba unos granos de polen a través del microscopio en 1827. Observó que estos granos (que habitualmente tienen un diámetro menor que media centésima de milímetro) se movían de un modo espasmódico y zigzagueante cuando flotaban en el agua. Al principio se pensó que los granos estaban vivos y nadaban en el agua, pero pronto se vio claramente que todos los granos diminutos de cualquier tipo que estuvieran en suspensión dentro de un líquido (o en el aire) se movían de la misma manera, aunque fueran unas partículas (como las partículas de humo que flotan en el aire) sin relación alguna en absoluto con los seres vivos. En la década de 1860, a medida que la hipótesis atómica cobraba fuerza, varias personas sugirieron que este movimiento podría estar causado por el impacto de las moléculas del líquido con los granos —pero, para que una molécula pudiera darle un «empujón» medible a un grano de polen, esta molécula tendría que tener un tamaño que fuera una fracción bastante grande del tamaño del grano de polen, lo cual era claramente ridículo—. Más tarde, pero todavía en el siglo XIX, el físico francés Louis-Georges Gouy (1854-1926) y en Inglaterra William Ramsay (1852-1916), independientemente el uno del otro, sugirieron que el movimiento browniano se podría explicar mejor en términos estadísticos. Si una partícula suspendida en el agua o en el aire fuera bombardeada constantemente mediante un gran número de moléculas desde todos los lados, la fuerza que se ejercería sobre ella por término

medio sería la misma desde todas las direcciones. Sin embargo, de vez en cuando, sólo por azar, habría más moléculas golpeándola por un lado que por otro, por lo que el grano se apartaría a trompicones del lado por donde se ejerciera un exceso de presión. Pero no siguieron esta teoría con todo detalle, y, cuando Einstein desarrolló unas teorías similares de una manera estadística adecuada, es casi seguro que no conocía estas propuestas anteriores (Einstein era famoso por su costumbre de desarrollar teorías por sí mismo, partiendo de principios fundamentales, sin leer minuciosamente la información preexistente en relación con el tema en la literatura científica publicada con anterioridad).

La razón por la cual el papel de Einstein resultó tan influyente fue que era preciso —dio una solución matemática y estadística exacta al problema—. Se podría pensar que, ya que la presión sobre el grano de polen, como promedio, es la misma por todos los lados, este grano debería estar siempre más o menos en el mismo lugar, meneándose sin cambiar de sitio. Sin embargo, todo movimiento espasmódico es aleatorio, por lo que una vez que el grano se ha movido un poco en una dirección, es igualmente probable que se vuelva a mover en la misma dirección, o que se mueva en la contraria, volviendo a la posición de partida, o que se mueva en cualquier otra dirección distinta de la anterior. El resultado es que sigue una trayectoria zigzagueante en la que la distancia que recorre desde su punto de partida (medida sobre una línea recta que atraviesa los zigzagueos) es siempre proporcional a la raíz cuadrada del tiempo que ha transcurrido desde el primer golpe. Esto es cierto independientemente del momento desde el que se empiece a medir (sea cual sea la sacudida que se considere como primer golpe). Este proceso se conoce actualmente como «recorrido aleatorio» y la estadística en que se basa (desarrollada por Einstein)

resultó ser importante, por ejemplo, para describir la desintegración de elementos radioactivos.

Einstein utilizó valores numéricos en sus cálculos e hizo una predicción, basada en «la teoría cinético-molecular», que se podría comprobar mediante observaciones si cualquier microscopista fuera capaz de observar el movimiento browniano con la necesaria minuciosidad. Einstein halló una fórmula que relacionaba el número de Avogadro con la velocidad a la que se mueven las moléculas y la velocidad medible a la que las partículas se desvían de su posición inicial a causa del movimiento browniano. Utilizando para el número de Avogadro un valor de 6×10^{23} (un valor que no se sacó de la manga, sino que se basaba en otro trabajo que había estado realizando en 1905 y del que hablaremos más tarde)[17] para una partícula con un diámetro de una milésima de milímetro que estuviera en suspensión dentro del agua a 17 °C, predijo una desviación de seis milésimas de milímetro en un minuto (la partícula recorrerá el doble de distancia en 4 minutos, el cuádruplo de dicha distancia en 16 minutos, y así sucesivamente). El francés Jean Perrin (1870-1942) aceptó el desafío de medir esta lenta desviación con la precisión requerida y publicó los resultados de sus mediciones durante los últimos años de la primera década del siglo XX, ante lo cual Einstein se apresuró a escribirle, diciéndole: «Habría pensado que era imposible investigar el movimiento browniano con tal precisión; es una suerte para este tema que usted lo haya abordado». Una señal de lo importante que resultaba en aquellos tiempos esta prueba de la existencia de los átomos y las moléculas es que, en 1926, Perrin recibió el Premio Nobel por este trabajo.

El propio Einstein no había terminado aún del todo con la búsqueda de pruebas relativas a la existencia de los átomos y la indagación para determinar con exactitud el número de Avogadro. En octubre de 1910, escribió un informe en el que explica-

ba que el color azul del cielo se debe al modo en que las moléculas de gas del aire dispersan la luz. La luz azul se dispersa de este modo más fácilmente que la luz roja o amarilla, y ésta es la razón por la que la luz azul procedente del Sol nos llega desde el cielo en todas las direcciones, después de rebotar de una molécula a otra a través de los cielos, mientras que la luz directa del Sol es de color anaranjado. Ya en 1869, John Tyndall había hablado sobre este tipo de dispersión de la luz, pero en términos del efecto que producen sobre la luz las partículas de polvo que hay en el aire —esta dispersión por efecto del polvo, que aún capta más azul de la luz solar, es la razón por la cual el Sol parece más rojo al amanecer y durante el ocaso—. Otros científicos sugerían, y eran sugerencias correctas, que son las moléculas del aire, y no el polvo suspendido en el aire, lo que hace que el cielo sea azul; pero fue Einstein quien hizo cálculos aplicando datos numéricos, utilizando la intensidad del azul del cielo para calcular la constante de Avogadro por otro método, y al mismo tiempo aportó pruebas que apoyaban la realidad de la existencia de los átomos y las moléculas, por si aún hicieran falta dichas pruebas en el año 1910.

Sin embargo, a pesar de lo atractivo que pueda resultar este trabajo, su encanto palidece al lado de la obra por la se recuerda principalmente a Einstein, que también trata de la luz, pero de un modo mucho más fundamental. Con el fin de situar la teoría especial de la relatividad en su contexto, necesitamos remontamos para examinar el modo en que el conocimiento de la naturaleza de la luz se desarrolló durante el siglo XIX, y cómo esto llevó a Einstein a valorar la necesidad de realizar una modificación en las máximas más veneradas de toda la ciencia, las leyes del movimiento de Newton.

Capítulo 11

HÁGASE LA LUZ

Hasta el final del siglo XVIII, la concepción de Newton con respecto a la luz como una corriente de partículas dominaba sobre su rival, que era el modelo ondulatorio de la luz, por una parte a causa de la influencia que ejercía la talla científica de Newton como oráculo de la ciencia, y por otra parte debido a la evidencia de que el modelo de partículas era realmente mejor que el modelo ondulatorio. Sin embargo, durante los más o menos cien años siguientes, se desarrolló un nuevo conocimiento de la naturaleza de la luz, que demostró, por primera vez, que incluso Newton podía no ser infalible en sus pronunciamientos. Posteriormente, a principios del siglo XX, también sus leyes del movimiento dejaron de ser la última palabra en mecánica. En realidad, la influencia de Newton frenó el progreso en este sentido, ya que, dejando a un lado la obra de Huygens, que ya hemos mencionado anteriormente, hacia finales del siglo XVIII había gran cantidad de pruebas derivadas de observaciones que, si se hubieran considerado con más entusiasmo, podían haber llevado a la implantación del modelo ondulatorio un par de décadas antes del momento en que realmente se implantó. De hecho, surgieron ya algunas pruebas de que la luz se desplazaba como una onda, antes incluso de que Newton entrara en escena, aunque la importancia de estos trabajos no fue reconocida ampliamente en su época. Estas pruebas llegaron con los trabajos del físico italiano Francesco Grimaldi

(1618-1663), profesor de matemáticas del colegio de los jesuitas de la Universidad de Bolonia, quien, como Newton más tarde, estudió la luz haciendo que un haz de luz solar entrara a través de un pequeño agujero en una habitación oscura. Descubrió que, cuando el haz de luz pasaba a través de un segundo agujero pequeño y llegaba hasta una pantalla, la imagen que formaba el punto de luz sobre dicha pantalla tenía bordes coloreados y era ligeramente más ancha de lo que tendría que ser si la luz hubiera viajado en línea recta a través del agujero. Llegó a la conclusión (correcta) de que el haz se había doblado ligeramente hacia fuera al pasar por el agujero, un fenómeno al que dio el nombre de *difracción*. También descubrió que, cuando un pequeño objeto (como el filo de un cuchillo) se colocaba en el haz de luz, la sombra que proyectaba este objeto tenía bordes coloreados allí donde la luz había sufrido una difracción en torno al borde del objeto y se había ido hacia la sombra.[1] Esta es una prueba directa de que la luz se desplaza como una onda, y el mismo tipo de efecto se puede ver cuando las olas del mar, o de un lago, pasan rodeando obstáculos o a través de espacios situados entre obstáculos. Pero, cuando se trata de la luz, dado que las longitudes de onda son tan pequeñas, los efectos son insignificantes y sólo se pueden detectar mediante mediciones muy minuciosas. La obra de Grimaldi no se publicó hasta dos años después de la muerte de este científico, y apareció en un libro titulado *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride*; Grimaldi ya no estaba allí para promover o defender sus teorías y es probable que las pocas personas que supieron de la existencia de este libro en aquellos tiempos fueran incapaces o no tuvieran voluntad de llevar a cabo los delicados experimentos que habrían sido necesarios para confirmar los resultados. Un lector de este libro que quizá se daría cuenta de su importancia fue el propio Newton, que tenía 21 años cuando Grimaldi murió —pero parece como si no hubiera apreciado la contunden-

cia de las pruebas de Grimaldi, según las cuales ni la reflexión ni la refracción podían explicar los fenómenos observados—. Es tentador, pero en última instancia estéril, ponerse a especular sobre cómo podría haberse desarrollado la ciencia si Newton hubiera asumido el modelo ondulatorio después de leer el libro de Grimaldi.

El modelo ondulatorio de la luz vuelve a un primer plano

Después de que Newton muriera en 1727, aunque el modelo de la luz como corriente de partículas dominase el pensamiento durante el resto del siglo XVIII, hubo personas que tuvieron en cuenta el modelo alternativo, especialmente el matemático suizo Leonhard Euler, al que ya hemos mencionado anteriormente. Euler es recordado habitualmente por sus trabajos de matemática pura donde desarrolló la idea del principio de la mínima acción (según el cual, en efecto, la naturaleza es perezosa; una manifestación de este principio es que la luz viaja siempre en línea recta, es decir, siguiendo el camino más corto). Este principio marcó el camino para los trabajos de Joseph Lagrange (1736-1813), que a su vez proporcionaron la base para la descripción matemática del mundo cuántico que se realizó en el siglo XX. Euler, como ya hemos mencionado, introdujo notaciones matemáticas tales como i, e y π, y también fue el ejemplo arquetípico de los peligros que entraña mirar directamente al Sol. En 1733, cuando era catedrático de matemáticas en San Petersburgo, esta locura le costó perder la visión en el ojo derecho. Esta desgracia se duplicó, ya que a finales de la década de 1760 se quedó ciego del ojo izquierdo debido a las cataratas, pero nada de esto consiguió frenar su prodigiosa producción matemática.

Euler publicó su modelo para la luz en 1746, mientras estaba trabajando en la Academia de las Ciencias de Federico el Grande en Berlín (posteriormente Catalina la Grande le llamó para que regresara a San Petersburgo, donde se quedó hasta el final de su vida). Gran parte de la fuerza de los argumentos de Euler reside en el modo en que manejó minuciosamente todas las dificultades del modelo corpuscular, incluida la dificultad de explicar de esta manera la difracción, así como la de detallar las pruebas que apoyaban el modelo ondulatorio. Euler planteó concretamente una analogía entre las ondas luminosas y las ondas sonoras, y en una carta escrita durante la década de 1760 decía que la luz solar es «con respecto al éter lo que el sonido es con respecto al aire» y describió el Sol como «una campana cuyo sonido es la luz».[2] Esta analogía, aunque resulta muy gráfica, es en el mejor de los casos imperfecta y nos indica cuán largo era el camino que había de recorrer todavía el desarrollo del modelo ondulatorio a mediados del siglo XVIII; no es sorprendente que el mundo de la física no estuviera aún lo suficientemente convencido como para cambiar sus puntos de vista sobre la naturaleza de la luz, hasta que las técnicas experimentales que se perfeccionaron en el siglo XIX hicieron que esta cuestión quedara fuera de toda duda. Pero la primera persona que habría de dar un impulso significativo a este cambio de opinión tenía ya 10 años cuando Euler murió en 1783.

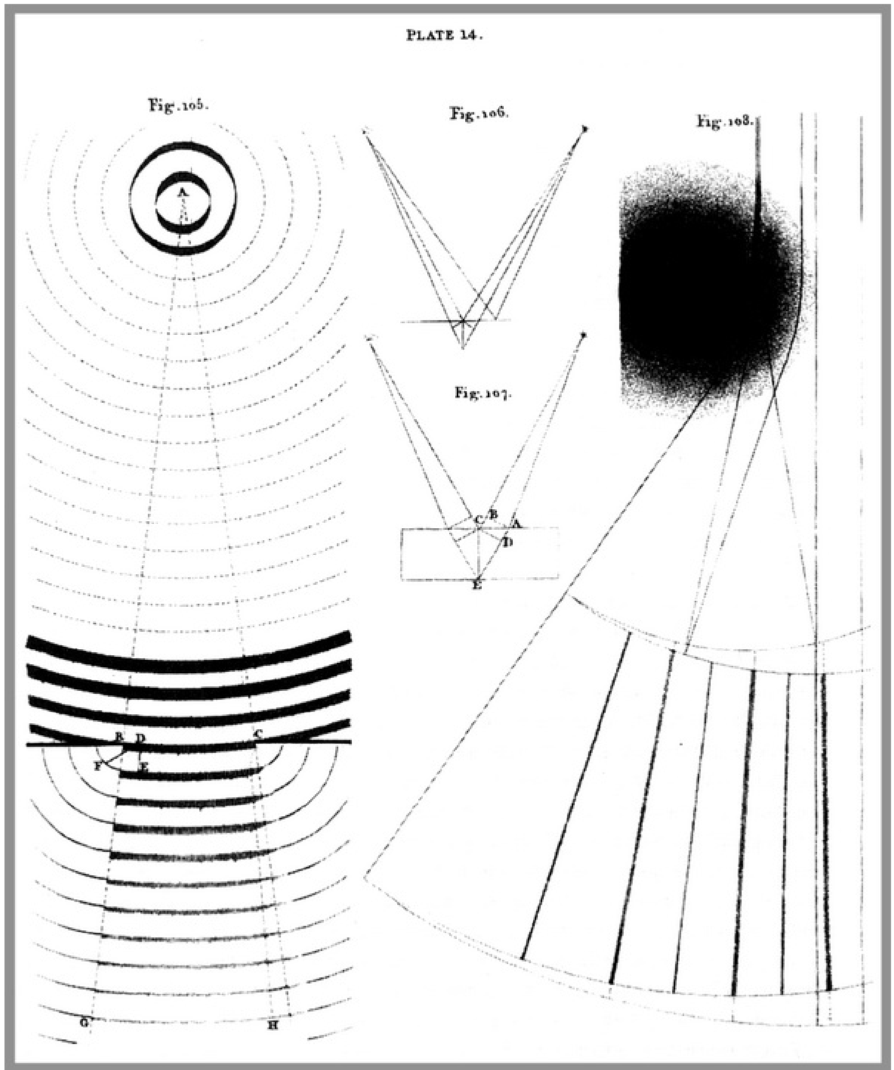
THOMAS YOUNG: EL EXPERIMENTO DE LA RENDIJA DOBLE

Thomas Young nació en Milverton, Somerset, el 13 de junio de 1773. Fue un niño prodigio que sabía ya leer en inglés a los 2 años de edad, en latín a los 6 y de allí pasó rápidamente al griego, el francés, el italiano, el hebreo, el caldeo, el siríaco, el samaritano, el árabe, el persa, el turco y las lenguas etiópicas —todo esto cuando tenía 16 años—. Dado que nació en una familia

adinerada (era hijo de un banquero), Young tuvo la libertad necesaria para hacer más o menos lo que le gustaba y recibió una educación muy poco reglada cuando era niño y adolescente. Estaba claro que no necesitaba este tipo de educación, por lo que se dedicó ampliamente a estudiar por su cuenta y se despertó en él un interés precoz por la historia antigua y la arqueología de Oriente Medio (como se puede deducir de la lista de idiomas), aunque también aprendió física, química y muchas más cosas. A los 19 años de edad, influido por su tío abuelo Richard Brocklesby (1722-1797), un físico destacado, Young comenzó a estudiar para hacerse médico, con la idea de trabajar en la consulta que tenía su tío abuelo en Londres, y hacerse cargo de ella a su debido tiempo. Estudió en Londres, Edimburgo y Gotinga, donde obtuvo su título de doctor en medicina en 1796, viajó por Alemania durante varios meses, antes de asentarse durante cierto tiempo en Cambridge (acababa de fallecer su tío abuelo). Para entonces, Young era ya conocido en los círculos científicos, después de haber explicado durante su primer año como estudiante de medicina el mecanismo de enfoque de los ojos, es decir, el modo en que los músculos cambian la forma de la lente en cada ojo. Como consecuencia de este trabajo, fue elegido miembro de la Royal Society cuando sólo contaba 21 años de edad. Durante los dos años que pasó en Cambridge, residiendo en el Emmanuel College, se ganó el apodo de fenómeno Young, por su habilidad y versatilidad. Pero Richard Brocklesby le había dejado como herencia su casa de Londres y su fortuna, por lo que en 1800 el joven regresó allí, a los 27 años, para abrir su propia consulta médica. Aunque ejerció la medicina durante el resto de su vida, siendo médico del hospital St. George desde 1811 hasta su muerte el 10 de mayo de 1829, esto no le impidió continuar realizando importantes y variadas contribuciones a la ciencia. Sin embargo, hay que decir que en un momento dado dejó ver un indicio de que no era del todo

infalible: entre 1801 y 1803 Young dio clases magistrales en la RI, pero éstas no tuvieron éxito, ya que estuvieron más allá de lo que podía llegar a captar la audiencia.

Entre los muchos temas que le interesaban, Young explicó correctamente el astigmatismo como un fenómeno ocasionado por una curvatura inadecuada en la córnea del ojo y fue la primera persona que constató que la visión del color se produce como resultado de una combinación de tres colores primarios (rojo, verde y azul) que afecta a distintos receptores dentro del ojo, y así explicó la ceguera a los colores como un trastorno debido al fallo en uno o más conjuntos de dichos receptores. Además, calculó los tamaños de las moléculas (como ya vimos en el capítulo anterior), trabajó como secretario de relaciones internacionales en la Royal Society y desempeñó un papel destacado en el proceso de descifrar la piedra de Rosetta, aunque no recibió un reconocimiento inmediato por esta tarea ya que el informe se publicó de forma anónima en 1819. Sin embargo, lo que aquí nos interesa son los trabajos por los que se recuerda principalmente a Young, es decir, los experimentos relativos a la luz con los que demostró que ésta se desplaza como una onda.



32. Dibujos de Young en los que se muestra cómo se propagan las ondas luminosas. (Young, *A Course on Natural Philosophy and Mechanical Arts*, 1807).

Young comenzó a experimentar con el fenómeno de la interferencia de los rayos luminosos mientras estaba en Cambridge, a finales de la década de 1790. En *Outlines of Experiments and Enquiries Respecting Sound and Light*, publicado en 1800, comparó y contrastó los modelos contrapuestos de Newton y Huygens, «saliendo» en defensa del modelo ondulatorio de Huy-

gens y proponiendo que los colores diferentes de la luz corresponden a longitudes de onda distintas. En 1801, anunció su contribución clave a este debate: la teoría de la interferencia de las ondas luminosas. Esta interferencia se produce exactamente del mismo modo que interfieren entre sí las ondas producidas en la superficie del agua contenida en una charca para producir una complicada pauta de ondulaciones (por ejemplo, cuando lanzamos dos guijarros a una charca al mismo tiempo, pero en distintos lugares). Young expuso primero el modo en que los fenómenos que el propio Newton había observado, tales como los anillos de Newton, podían explicarse mediante la interferencia, y utilizó los datos experimentales de Newton para calcular la longitud de onda de la luz roja, obteniendo $6{,}5 \times 10^{-7}$ metros (en unidades modernas), y la de la luz violeta, que resultó ser $4{,}4 \times 10^{-7}$ metros. Estos números concuerdan bien con las mediciones actuales, por lo que queda demostrado que Newton era un buen experimentador y Young era un buen teórico. Este último ideó después y llevó a cabo el experimento que lleva su nombre: el experimento de Young de la doble rendija.

En el experimento de la doble rendija, la luz (en el caso ideal se utiliza luz de un color puro —es decir, una sola longitud de onda— aunque esto no es absolutamente necesario) pasa a través de una estrecha rendija recortada en un trozo de cartulina («estrecha» quiere decir que la rendija debe ser más o menos tan ancha como la longitud de onda de la luz, aproximadamente una millonésima de metro, de tal manera que puede servir una rendija hecha con una hoja de afeitar). La luz que sale por la rendija se esparce e incide sobre un segundo trozo de cartulina en el que hay dos rendijas similares paralelas. Cuando la luz sale por estas dos rendijas se esparce a su vez e incide sobre una pantalla donde forma una imagen de luz y sombra, llamada espectro interferencial o espectro de interferencias. Young expli-

có que había luz allí donde las ondas que llegaban de las dos rendijas caminaban llevando el paso, de tal forma que los picos de ambas ondas se sumaran; había oscuridad donde las ondas procedentes de las dos rendijas no llevaban el paso conjuntamente (marchaban con desfase), de tal forma que el pico de una onda quedaba anulado por el seno de la otra onda. El espaciamiento exacto del espectro que se ve en la pantalla depende de la longitud de onda de los rayos luminosos, que se puede calcular midiendo el espaciamiento de las franjas que aparecen en la pantalla. No hay en absoluto modo alguno de explicar este fenómeno si se considera que la luz es como una corriente de diminutas balas de cañón que van zumbando por el espacio. Young terminó en lo esencial su trabajo hacia 1804, y en 1807 escribió lo siguiente:

> El centro (del espectro) está siempre claro, y las franjas brillantes situadas a cada lado se encuentran a distancias tales que la luz que les llega desde una de las aberturas tiene que haber recorrido un espacio más largo que la que llega desde la otra, siendo la diferencia entre los recorridos igual a la amplitud de una, dos, tres o más de las supuestas ondulaciones, mientras que los espacios oscuros que aparecen corresponden a una diferencia igual a la mitad de una de las supuestas ondulaciones, o a una y media, o a dos y media, o a más aún.[3]

Diez años más tarde, Young perfeccionó todavía más su modelo sugiriendo que las ondas luminosas son producidas por una «ondulación» transversal que se mueve de lado a lado, y no por ondas longitudinales (de empujar-tirar) como las del sonido. Sin embargo, lejos de convencer a sus colegas, los trabajos de Young sobre la luz sólo le reportaron insultos de los demás físicos de Gran Bretaña, a los que irritaba la mera sugerencia de que cualquier cosa dicha por Newton pudiera estar equivocada y se burlaban de la idea de que pudiera hacerse la oscuridad «superponiendo» dos haces de luz. Young, que se dedicaba a muchas otras cosas al mismo tiempo, sufrió poco con todo esto y, además, tampoco se vio frenado el avance de la ciencia, porque, casi inmediatamente, llegaron otras pruebas similares que

apoyaban la validez del modelo ondulatorio. Estas pruebas provenían, curiosamente, del país que era por entonces enemigo más encarnizado de Gran Bretaña: Francia.

Augustin Fresnel nació el 10 de mayo de 1788 en Broglie, Normandía. Era hijo de un arquitecto que se retiró a sus propiedades campestres cerca de Caen para escapar del torbellino de la Revolución Francesa (un caso que recuerda al de la familia d'Héricy y al de Georges Cuvier). Fresnel recibió enseñanza en su propia casa hasta los 12 años. Posteriormente estudió en la Ecole Céntrale de Caen, antes de trasladarse a París en 1804 para estudiar ingeniería. En 1809 obtuvo el título de ingeniero civil y trabajó para el gobierno en proyectos de construcción de carreteras en distintas zonas de Francia, al mismo tiempo que desarrollaba un gran interés por la óptica, simultaneando sus estudios científicos con el trabajo cotidiano. Sin embargo, dado que Fresnel vivía fuera de los círculos de los científicos académicos de París, parece ser que no llegó a conocer los trabajos de Young; lo que aún sorprende más es que tampoco tuviera conocimiento de la obra de Huygens y Euler, y que desarrollara finalmente su propio modelo ondulatorio de la luz partiendo de la nada. Fresnel tuvo la oportunidad de desarrollar dicho modelo en parte gracias a la política. Aunque había trabajado como empleado del gobierno bajo el régimen napoleónico sin dar señales de inconformismo, cuando Napoleón fue derrotado por los aliados y enviado al exilio en Elba, Fresnel, como muchos de sus contemporáneos, se declaró realista. Cuando Napoleón regresó del exilio para tomar el poder durante el episodio de los Cien Días en 1815, Fresnel fue expulsado de su empleo, o lo abandonó voluntariamente en señal de protesta (existen informaciones contradictorias al respecto), y fue enviado a su casa de Normandía, donde estuvo bajo arresto domiciliario. Fue allí donde tuvo tiempo suficiente para desarrollar sus teorías antes de que Napoleón fuera derrocado definitivamente. Entonces,

Fresnel pudo volver a su trabajo de ingeniero y la óptica quedó relegada, una vez más, a lo que era simplemente una actividad de aficionado.

El planteamiento de Fresnel para el modelo ondulatorio de la luz estaba basado también en la difracción, pero utilizó una sola rendija estrecha para proyectar los rayos luminosos sobre una pantalla. Si la rendija es lo suficientemente estrecha, produce su propio espectro característico de rayas de luz y sombra sobre la pantalla. Sin entrar en detalles, la forma más sencilla de explicar cómo sucede esto es imaginar que la luz se desvía ligeramente alrededor de cada lado de la rendija, se dispersa a partir de cada borde y se desplaza hacia la pantalla por dos caminos ligeramente diferentes, tales que cada uno de ellos corresponde a un número distinto de longitudes de onda. Pero también podemos dar la vuelta a este experimento colocando un pequeño obstáculo (por ejemplo, una aguja) en el camino de un haz luminoso. Entonces, la luz se desvía alrededor del obstáculo (del mismo modo que las olas del mar se desvían alrededor de una roca que sobresale de la superficie del agua) para producir un espectro de difracción en la sombra del obstáculo.

Una muestra de lo poco que se había valorado el trabajo de Young es que en 1817 la Academia Francesa, aunque conocía este trabajo, ofreció un premio para quien pudiera aportar el mejor estudio experimental sobre la difracción y lo apoyara en un modelo teórico con el que pudiera explicar en qué consistía el fenómeno. Este concurso dio como resultado la presentación de tan sólo dos trabajos. Uno de ellos era tan claramente absurdo que la Academia ni siquiera registró el nombre de la persona que lo había presentado, y mucho menos detalles del trabajo en sí mismo. El otro trabajo era de Fresnel y fue presentado como un informe de 135 páginas. Tenía que superar un obstáculo bastante considerable: era, por supuesto, un modelo ondulatorio y los tres jueces que decidían en este concurso —el matemá-

tico Siméon-Denis Poisson (1781-1840), el físico Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y el matemático y astrónomo Pierre-Simon Laplace— eran todos ellos newtonianos declarados y, por consiguiente, preferían el modelo corpuscular. Sus esfuerzos se centraron en buscar algún fallo en el modelo de Fresnel, y Poisson, que era un magnífico matemático, creyó haber encontrado uno. Calculó que, según el modelo ondulatorio de la luz de Fresnel, si un pequeño objeto redondo (como un balín de plomo) se sitúa en el camino de un haz luminoso, la luz que se desvía rodeando el objeto produciría un punto brillante exactamente detrás del centro de dicho objeto, donde, según el sentido común, tendría que estar la sombra más oscura. Esto le pareció a Poisson tan absurdo como les había parecido a los británicos contrarios al trabajo de Young la idea de que al superponer dos haces de luz se podría producir la oscuridad total. Pero los cálculos no tenían nada de ambiguos. Como el propio Poisson escribió:

> Hagamos que unos haces luminosos paralelos incidan sobre un disco opaco, siendo el entorno del disco perfectamente transparente. El disco proyecta una sombra —por supuesto—, pero el centro de esta sombra será un punto luminoso. Para decirlo concisamente, no hay oscuridad en lugar alguno a lo largo de la perpendicular central en la parte posterior de un disco opaco (excepto inmediatamente detrás del disco). De hecho, la intensidad de la luz crece continuamente a partir de cero desde el punto situado inmediatamente detrás del fino disco. A una distancia medida detrás del disco que sea igual al diámetro de éste, la intensidad es ya un 80 por 100 de lo que sería si no estuviera el disco. Por consiguiente, la intensidad crece más lentamente, acercándose al 100 por 100 de lo que sería si el disco no estuviera presente.[4]

Para los jueces, esto resultaba absurdo, pero era lo que predecía el modelo de Fresnel. Como buenos científicos, en la mejor tradición newtoniana, estos jueces y el presidente del jurado constituido para supervisar el concurso, el físico François Arago (1786-1853), organizaron las cosas para realizar un experimento con el que comprobarían la predicción. El punto luminoso que se había pronosticado apareció exactamente donde

Poisson, basándose en el modelo de Fresnel, había dicho que estaría. En marzo de 1819, Arago comunicó lo siguiente al Consejo de la Academia de las Ciencias:

> Uno de los miembros de la comisión [establecida por la Academia], el señor Poisson, ha deducido a partir de las integrales que ha aportado el autor [Fresnel] el curioso resultado de que el centro de la sombra de una pantalla opaca circular debe… estar iluminada exactamente igual que si la pantalla no existiera. La conclusión ha sido sometida a la prueba del experimento directo y la observación ha confirmado perfectamente los cálculos.

El método totalmente científico que Newton había convertido en el fundamento de la investigación del mundo, la «prueba del experimento directo», había demostrado que Newton estaba en un error y la luz viajaba como una onda. A partir de aquel momento, el modelo ondulatorio de la luz dejó de ser una mera hipótesis y ascendió al nivel de teoría. La reputación de Fresnel estaba asegurada y, aunque sólo era un científico a tiempo parcial, llevó a cabo junto con Arago un importante trabajo de desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz, y fue elegido miembro de la Academia Francesa en 1823 y de la Royal Society en 1825. En 1827 recibió la medalla Rumford, cien años después de la muerte de Newton y unos pocos días antes de su propio fallecimiento, que se produjo a causa de la tuberculosis el 14 de julio de aquel mismo año. Fueron necesarias varias décadas para que la teoría ondulatoria de la luz se desarrollara adecuadamente y, en particular, para que los físicos averiguaran qué era lo que se movía con las ondas. Pero esto no impidió que se avanzara en la práctica utilizando la luz. El propio Fresnel inventó una lente muy eficaz formada por círculos anulares concéntricos de vidrio, cada uno de ellos con una curvatura ligeramente diferente (lente de Fresnel), que fue ideada inicialmente para ser utilizada en los faros de la costa. Sin embargo, era la luz en sí misma la que se estaba convirtiendo en lo que probablemente haya sido el instrumento más valioso dentro de la

ciencia, concretamente a través de una nueva rama llamada espectroscopia.

La espectroscopia es un elemento confortable dentro del conjunto de accesorios que utiliza la ciencia, una herramienta científica tan valiosa y tan importante que sorprende oír que no siempre estuvo a disposición de los científicos y que no se empezó a conocer hasta principios del siglo XIX. Es como si nos dijeran que antes de 1800 nadie sabía que el Papa era católico. Pero, como tantos otros avances científicos, la espectroscopia tuvo que esperar a que se desarrollase la tecnología adecuada para poder trabajar con ella —en este caso, la combinación de un prisma o de otros sistemas para descomponer la luz en el espectro de colores del arco iris y un microscopio que se pudiera utilizar para explorar dicho espectro detalladamente.

Las rayas de Fraunhofer

Cuando se estudia la luz de esta manera, se puede ver que existen muchas rayas distintas y nítidas en el espectro —unas claras y otras oscuras—. La primera persona que se dio cuenta de esto fue el físico y químico inglés William Wollaston (1766-1828), que hizo que la luz solar pasara a través de un prisma y estudió, en 1802, el espectro resultante, tras ampliar su tamaño, viendo que aparecían algunas rayas oscuras. Wollaston fue un buen científico polifacético de segunda fila que descubrió los elementos llamados rodio y paladio, y fue además uno de los primeros defensores de la teoría atómica de Dalton, aunque nunca aportó a la ciencia una contribución que fuera realmente importante. En cierto modo, Wollaston nunca se puso a investigar sobre su descubrimiento de las rayas oscuras del espectro de la luz solar, tarea que quedó pendiente para que la asumiera el físico industrial alemán Josef von Fraunhofer (1787-1826), quien hizo el mismo descubrimiento, de manera

independiente, en 1814, y, lo que es más importante, estudió el descubrimiento, realizando una investigación adecuada del fenómeno, razón por la cual las rayas oscuras del espectro solar se llaman actualmente rayas de Fraunhofer, y no rayas de Wollaston. Fraunhofer inventó también, en 1821, otra técnica para descomponer la luz en su espectro, las redes de difracción, que, como su nombre indica, para su acción dependen completamente de la naturaleza ondulatoria de la luz. Sin embargo, todo esto se consiguió porque Fraunhofer trabajaba en el laboratorio óptico del Instituto Mecánico-Optico de Munich, donde intentaba mejorar la calidad del vidrio con el que se fabricaban las lentes y los prismas que se iban a utilizar luego en trabajos científicos y en las industrias de alta tecnología de la época. Su destreza hizo rica a la empresa y puso los fundamentos para que Alemania se convirtiera en una potencia industrial de primera fila en lo relativo a la fabricación de sistemas ópticos durante la mayor parte del siglo.

El estudio de la espectroscopia y el espectro de las estrellas

Uno de los primeros descubrimientos espectroscópicos que hizo Fraunhofer fue que había dos rayas luminosas amarillas en el espectro de la luz procedente de una llama. Pronto quedó claro que cada una de estas rayas tenía una longitud de onda especial bien definida. En 1814, Fraunhofer estaba utilizando las dos rayas luminosas amarillas (de las que se sabe actualmente que están originadas por el sodio y son responsables del color amarillo que tiene la luz del alumbrado público) como fuente de luz monocromática pura con la que probar las propiedades ópticas de las distintas clases de vidrio. Precisamente cuando comparaba el efecto del vidrio sobre este tipo de luz con el efecto sobre la luz solar, observó la aparición de rayas oscuras

en el espectro solar, y gracias a la calidad superior de sus instrumentos consiguió ver muchas más que Wollaston, contando un total de 576 entre los extremos rojo y violeta del espectro, y además registró las longitudes de onda de cada una de ellas. También observó unas rayas similares en el espectro de Venus y las estrellas. Al observar que aparecían las mismas rayas y las mismas longitudes de onda en los espectros obtenidos usando las redes de difracción, demostró que eran una propiedad de la propia luz, y no un fenómeno producido por el vidrio de los prismas al ser atravesado por los rayos luminosos. Fraunhofer nunca llegó a descubrir qué era lo que ocasionaba las rayas, pero fue él quien perfeccionó el uso de la espectroscopia dentro de la ciencia.

Aunque muchos investigaron aquel fenómeno recientemente descubierto, los descubrimientos cruciales se realizaron en Alemania, siendo sus autores Robert Bunsen (1811-1899) y Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que trabajaron juntos en Heidelberg durante las décadas de 1850 y 1860. No es mera coincidencia que se trate del mismo Robert Bunsen que dio su nombre al equipamiento de laboratorio que nos resulta quizá más conocido, ya que el mechero Bunsen fue un instrumento fundamental para el desarrollo de la espectroscopia.[5] Cuando una sustancia se calienta en la clara llama de un mechero Bunsen, da un color característico a la llama, dependiendo de cuál sea la sustancia que se está calentando (no debería ser sorprendente para ninguno de nosotros oír que una sustancia que contiene sodio, como la sal común, hace que la llama sea amarilla). Incluso sin recurrir a la espectroscopia, éste es un modo sencillo de comprobar si determinados elementos están presentes en un compuesto químico. Pero, con la ayuda de la espectroscopia, se puede ir más allá de decir que un elemento da color amarillo a la llama, otro le da color verde y un tercero la pone de color rosa; se puede ver que cada elemento, cuando está caliente, pro-

duce en el espectro una pauta característica de rayas luminosas, como el par de rayas amarillas que están asociadas con el sodio. Entonces, siempre que veamos esas rayas en un espectro, sabremos que el elemento asociado a dichas rayas está presente —incluso, como sucedía a veces en el siglo XIX, aunque no supiésemos cómo forman los átomos de los elementos dichas rayas—. Cada espectro tiene un valor de identificación similar al que puedan tener, en otro contexto, las huellas dactilares o los códigos de barras. Cuando una sustancia está caliente, al irradiar luz produce rayas luminosas; cuando la misma sustancia está presente, pero en frío, produce rayas oscuras en el espectro, ya que absorbe luz de fondo precisamente con las mismas longitudes de onda, en vez de irradiar luz, que es lo que hace cuando está caliente.[6] Realizando una serie de «pruebas de llama» en el laboratorio con distintos elementos, era evidente que se podía formar una colección de pautas espectrales características asociadas con cada uno de los elementos conocidos. En 1859, Kirchoff identificó las rayas características del sodio en los rayos luminosos procedentes del Sol —una prueba de que el sodio está presente en la atmósfera de nuestra estrella más cercana. Otras rayas del espectro solar, y luego del espectro de otras estrellas, fueron pronto identificadas con otros elementos. En lo que fue el ejemplo más impactante del poder de la espectroscopia, los astrónomos pudieron descubrir de qué estaban hechas las estrellas. En una sorprendente inversión de este proceso, en 1868, durante un eclipse solar, el astrónomo francés Pierre Jansen (1824-1907) y el astrónomo inglés Norman Lockyer (1836-1920) descubrieron una pauta de rayas en el espectro solar que no se correspondía con la «huella dactilar» de ningún elemento conocido existente en la Tierra; Lockyer dedujo que debía pertenecer a algún elemento desconocido hasta entonces, al que denominó «helio», tomando el nombre de Helios, la palabra que en griego quiere decir Sol. El helio no se

descubrió en la Tierra hasta 1895. Para entonces, sin embargo, el rompecabezas que era la naturaleza de la luz parecía haberse resuelto totalmente, gracias a la comprensión de lo que eran la electricidad y el magnetismo, que había emergido gracias a los trabajos de Michael Faraday, antiguo ayudante de Humphry Davy, y se había desarrollado plenamente con las investigaciones de James Clerk Maxwell, en lo que se consideró el avance más profundo de la nueva física desde los tiempos de Newton.

Michael Faraday: estudios sobre electromagnetismo

Faraday es casi único entre los científicos de renombre en cuanto al hecho de no haber realizado nada importante antes de cumplir 30 años, pero luego fue autor de una de las contribuciones más importantes que hizo su generación (o, en realidad, cualquier otra generación), llevando a cabo su mejor trabajo cuando tenía más de 40 años. Han sido pocos los casos de científicos que continuaron activos al más alto nivel durante sus últimos años (Albert Einstein es un ejemplo obvio), pero incluso éstos habían mostrado signos de una destreza inusual cuando tenían entre 20 y 30 años. Es casi seguro, dados sus logros posteriores, que Faraday podría haberlo hecho también, pero sus circunstancias le impidieron incluso comenzar a realizar investigaciones científicas antes de los 25 años —una edad a la que Einstein ya había llevado a cabo, no sólo los trabajos sobre los átomos, ya mencionados en el capítulo anterior, sino también la teoría especial de la relatividad y la obra por la que recibiría posteriormente el Premio Nobel.

La familia Faraday procedía de lo que era entonces Westmorland, al norte de Inglaterra. El padre de Michael, James, era un herrero que se trasladó al sur en 1791 para buscar trabajo en compañía de su esposa Mary y dos hijos pequeños, Robert, nacido en 1788, y Elizabeth, nacida en 1787. La familia se estable-

ció durante un breve tiempo en Newington, que era entonces un pueblo de Surrey y actualmente ha sido tragado por Londres, donde nació Michael el 22 de septiembre de 1791. Pero la familia se trasladó pronto a Londres, instalándose en unas habitaciones situadas sobre una cochera en Jacob's Well Mews, cerca de Manchester Square, donde nació otra hija, Margaret, en 1802. Aunque James Faraday era un buen herrero, tenía mala salud y a menudo era incapaz de trabajar (falleció en 1810), por lo que sus hijos se criaron en la pobreza, sin dinero para lujos tales como una educación que fuera más allá de leer, escribir y algo de aritmética (sin embargo, incluso esto los hacía diferentes de la gente más pobre de la época). Pero era una familia muy unida, en la que se querían mucho los unos a los otros, y se apoyaban en gran medida en su fe religiosa como miembros de una secta, los sandemanianos, que había surgido en la década de 1730 como una escisión de los presbiterianos escoceses. Su firme creencia en la salvación les ayudaba a soportar más fácilmente los momentos duros de la vida terrenal, y la doctrina de la secta, basada en la modestia, el rechazo de la ostentación y la vanidad, y el compromiso con las obras de caridad realizadas con discreción, contribuyó a caracterizar la vida de Faraday.

Cuando tenía 13 años, Michael Faraday comenzó a trabajar como recadista para George Riebeau, un librero, encuadernador y vendedor de periódicos que tenía un local en Blandford Street, a la altura de Baker Street, no lejos de donde residía la familia Faraday. Un año más tarde comenzó como aprendiz de Riebeau con las tareas de encuadernación y pronto se trasladó a vivir encima del local. Aunque se sabe poco sobre la vida de Faraday durante los cuatro años siguientes, la feliz atmósfera familiar existente en el negocio de Riebeau y su benevolencia como patrono puede deducirse del hecho de que uno de los tres aprendices que tenía en aquella época se convirtió en cantante

profesional y otro fue a ganarse la vida como comediante en los teatros de variedades, mientras Faraday leía con voracidad los grandes montones de libros que tenía a su alcance y llegó a convertirse en un gran científico. Por ejemplo, su fascinación por la electricidad, el área en la que haría posteriormente sus mayores contribuciones a la ciencia, se vio estimulada por primera vez gracias a la lectura de un artículo sobre el tema en una copia de la tercera edición de la *Enciclopedia británica* que alguien había llevado al taller para que se la encuadernaran.

En 1810, el año en que murió su padre,[7] Faraday se convirtió en miembro de la City Philosophical Society, que, a pesar de este nombre tan flamante, era un grupo de jóvenes ansiosos por perfeccionar su formación de manera autodidacta, que se reunían para comentar los temas del día, incluidos los nuevos y emocionantes descubrimientos científicos, y que se turnaban para dar conferencias sobre temas concretos (Robert Faraday pagaba la suscripción de Michael, un chelín, ya que Robert se había convertido en cabeza de familia y trabajaba como herrero). A través de sus discusiones y del intercambio de correspondencia con los amigos que encontró allí, Faraday comenzó a desarrollar tanto sus conocimientos científicos como su destreza personal, trabajando con perseverancia para mejorar la gramática, la ortografía y la puntuación. Llevó a cabo experimentos tanto de química como de electricidad, comentándolos con sus compañeros, los «City Philosophers», y también tomó notas detalladas de los temas que se discutían en las reuniones y luego las encuadernó cuidadosamente. En 1812, cuando se acercaba ya a los 21 años de edad y se encontraba al final de su etapa de aprendiz, tenía escritos cuatro volúmenes de su obra, que el indulgente Riebeau, encantado de tener a un joven filósofo entre el personal de su casa, solía mostrar con orgullo a sus amigos y clientes. Uno de estos clientes era un tal señor Dance, y se quedó tan impresionado que pidió prestados los li-

bros para mostrárselos a su padre, un hombre interesado por la ciencia; el señor Dance padre se quedó a su vez favorablemente impresionado, por lo que regaló a Faraday entradas para que pudiera asistir a una serie de cuatro conferencias sobre química impartidas por Humphry Davy en la Royal Institution durante la primavera de 1812 (que resultó ser el último curso que Davy impartió allí). Faraday aplicó su procedimiento a estas conferencias y las reprodujo por escrito meticulosamente, completándolas con diagramas y encuadernándolas en un libro, que mostró también al señor Dance padre. Este se sintió encantado ante tal respuesta a su generosidad.

Sin embargo, aunque estas conferencias habían confirmado el ardiente deseo de Faraday de convertirse en un científico, no parecía haber ningún modo de que aquel deseo se hiciera realidad. Su período de aprendizaje terminó el 7 de octubre de 1812 y comenzó a trabajar como encuadernador para el señor De la Roche, que ha pasado a la historia como un patrono difícil, pero probablemente fue sólo un hombre de negocios corriente que esperaba que sus empleados pusieran los cinco sentidos en el trabajo. Pero la mente de Faraday estaba ciertamente en otras cuestiones —escribió a todas las personas de las que pudo pensar que le ofrecerían una solución (incluido el presidente de la Royal Society, sir Joseph Banks, que ni siquiera se molestó en contestarle), aunque fueran trabajos de nivel ínfimo dentro del mundo de la ciencia, pero todo fue en vano. Sin embargo, a las pocas semanas tuvo un golpe de suerte que cambiaría su vida. Davy se quedó ciego temporalmente a causa de una explosión que se produjo en su laboratorio y necesitó a alguien que tuviera algunos conocimientos de química para que trabajara como su secretario durante unos pocos días. Faraday consiguió el empleo (muy probablemente gracias a una recomendación del señor Dance padre). No hay constancia del modo en que se las arregló con su trabajo para tener tiempo libre y poder desem-

peñar sus funciones como secretario de Davy, pero el hecho de que pudiera hacerlo sugiere que el señor De la Roche no era tan explotador como lo suelen pintar a veces. Cuando Faraday tuvo que volver a sus asuntos después de que Davy se hubo recuperado, envió a Davy el cuaderno con las notas de las conferencias a las que había asistido durante la primavera, con una carta en la que le pedía, o prácticamente, le suplicaba, que se le tuviera en cuenta para algún empleo en la Royal Institution (RI), aunque fuera el trabajo más modesto.

No había vacantes, pero entonces llegó la segunda parte de su golpe de suerte. En febrero de 1813, William Payne, ayudante de laboratorio en la RI y hombre aficionado a la bebida, tuvo que ser despedido después de haber agredido al fabricante de instrumentos (no sabemos cuál pudo ser el motivo de la reyerta). Davy ofreció a Faraday el puesto, con la advertencia de que «la ciencia era una amante muy desabrida y, desde un punto de vista pecuniario, recompensaba pobremente a los que se dedicaban por entero a su servicio».[8] a Faraday no le importó. Aceptó el trabajo por una guinea a la semana, más el alojamiento en dos habitaciones situadas en la parte más alta del edificio de la RI en Albermarle Street, incluidas las velas y con combustible para el fuego (el salario era en realidad menos que lo que había estado ganando como encuadernador). Tomó posesión del puesto el 1 de marzo de 1813 y, entre otras cosas, se convirtió literalmente en el lavabotellas de Humphry Davy. Sin embargo, desde un principio fue siempre mucho más que un lavabotellas y trabajó con Davy en casi todos los experimentos que éste llevó a cabo durante el tiempo en que permaneció todavía en la RI.

La valía de Faraday como ayudante queda clara si se considera el hecho de que seis meses más tarde Davy pidió a Faraday que le acompañara a él y a su esposa a realizar un recorrido por Europa en calidad de ayudante científico. La razón por la que

los franceses accedieron gustosos a proporcionar pasaportes al grupo de Davy fue que dicho grupo se presentó como una expedición científica que iba a investigar, entre otras cosas, los procesos químicos en las regiones volcánicas. Ciertamente se trataba de una expedición científica, pero la presencia de lady Davy hizo que al mismo tiempo fuera también una especie de luna de miel y a Faraday le planteó algunos problemas. Debido a que el ayuda de cámara de Davy se negó en el último momento a aventurarse por la Francia napoleónica, a Faraday se le pidió que hiciera trabajo doble, asumiendo las tareas del criado, al mismo tiempo que ayudaba en los trabajos de química. Probablemente todo esto hubiera funcionado razonablemente bien si Davy no hubiera estado acompañado por su esposa, pero parece ser que lady Davy se tomó muy en serio la relación entre señora y criado, haciéndole a Faraday la vida tan dura que más de una vez éste estuvo seriamente tentado de abandonar la expedición y regresar a casa, pero con fuerza de voluntad resistió hasta el final y así pudo disfrutar de una experiencia que cambió su vida de una manera muy positiva.

Antes de que el grupo saliera de viaje, el 13 de octubre de 1813, Faraday era un joven ingenuo que nunca había viajado a más de 20 kilómetros del centro de Londres. Cuando regresaron, año y medio más tarde, Faraday había conocido a muchos de los más destacados científicos de Francia, Suiza e Italia, había visto montañas y el mar Mediterráneo (así como el telescopio que utilizó Galileo para descubrir las lunas de Júpiter), y ya no era sólo un ayudante de Davy, sino que se había convertido en su colaborador científico. Había aprendido a leer el francés y el italiano, y también hablaba francés bastante bien. La RI reconoció inmediatamente que las aptitudes de Faraday habían mejorado. Para participar en el viaje, Faraday había tenido que renunciar a su empleo en la RI, sólo seis meses después de haberlo aceptado, pero con la garantía de que a su regreso volve-

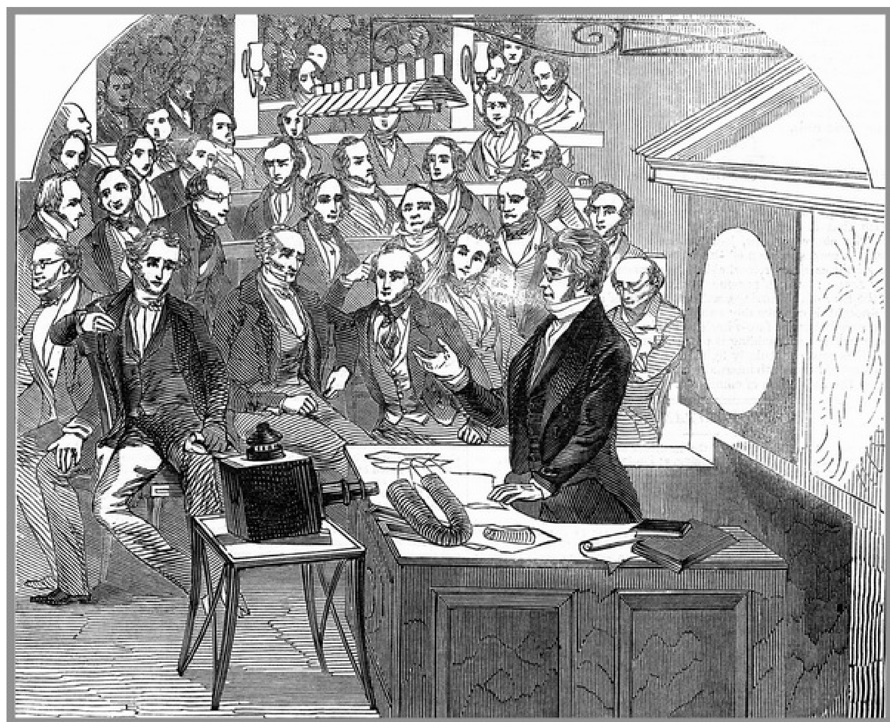
ría a ser contratado en condiciones no menos favorables. En efecto, fue nombrado director de mantenimiento, además de ayudante de laboratorio y de la gestión de la colección mineralógica, vio su paga aumentada hasta 30 chelines semanales y recibió para su alojamiento unas habitaciones mejores que las anteriores en la RI. Cuando Davy, como ya hemos dicho, se retiró de su trabajo cotidiano en la RI, Faraday aumentó de categoría, consiguiendo una reputación de químico coherente y fiable, aunque no mostraba todavía indicio alguno de ser un científico brillante. El 12 de junio de 1821, cuando había cumplido 30 años de edad, se casó con Sarah Bamard, otra sandemaniana, y ambos vivieron (la pareja no tuvo hijos) «encima del negocio» en Albermarle Street hasta 1862 (los sandemanianos no parecen haber sido aficionados a salir mucho de su ambiente; cinco años más tarde, Margaret, hermana de Michael, se casó con John, que era hermano de Sarah). Fue por aquel entonces cuando Faraday investigó por primera vez los fenómenos eléctricos que más tarde le harían famoso, aunque incluso entonces, durante una década, no profundizó demasiado en el tema.

En 1820, el danés Hans Christian Oersted (1777-1851) había descubierto que existe un efecto magnético asociado a las corrientes eléctricas. Observó que, cuando la aguja magnética de una brújula se sostiene sobre un cable por el que circula corriente eléctrica, la aguja se desvía colocándose transversal al cable, formando con éste un ángulo recto. Esto era algo totalmente inesperado, ya que parecía sugerir la existencia de una fuerza magnética que estaría actuando en un círculo (o en una serie de círculos) alrededor del cable, algo bastante diferente de las fuerzas habituales que tiran o empujan y que son las fuerzas con que los imanes se atraen o se repelen entre sí, y del modo en que la electricidad estática y la gravedad actúan, es decir, claramente como fuerzas de atracción, y en el caso de la electricidad estática también de repulsión. Cuando estas noticias sen-

sacionales se difundieron por Europa, muchos repitieron el experimento e intentaron encontrar una explicación para el fenómeno. Uno de ellos fue William Wollaston, al que se le ocurrió la idea de que la corriente eléctrica se desplaza recorriendo una trayectoria en forma de hélice por el cable, como un niño que desciende por un tobogán de feria, y que esta corriente que se retorcía era la que daba lugar a la fuerza magnética circular. Según el razonamiento de Wollaston, un cable que lleve corriente eléctrica debería girar sobre su eje (como una peonza muy estrecha) si lo acercamos a un imán. En abril de 1821, Wollaston visitó la Royal Institution y llevó a cabo algunos experimentos en colaboración con Davy, intentando reproducir este efecto, pero no lo consiguieron. Faraday, que no había estado presente durante estos experimentos, se sumó después a la tarea de dar una explicación al respecto.

Más tarde, también durante el año 1821, la revista *Annals of Philosophy* pidió a Faraday que escribiera un informe histórico sobre el descubrimiento de Oersted y sus repercusiones. Dado que Faraday era un hombre concienzudo, con el fin de realizar esta tarea adecuadamente, repitió todos los experimentos que había decidido explicar en su artículo. En el transcurso de estos trabajos, se dio cuenta de que un cable por el que circulara una corriente eléctrica tendría que moverse describiendo un círculo alrededor de un imán fijo, e ideó un experimento para demostrar esto, pero también ideó otro en el que un imán se movía alrededor de un cable fijo por el que circulaba una corriente eléctrica. «El cable», escribió Faraday, «tiende siempre a colocarse en ángulo recto con respecto al polo [del imán], de hecho tiende a moverse en círculo alrededor de él». Esto era bastante diferente del fenómeno (inexistente) que había comentado Wollaston, pero, cuando el informe de Faraday se publicó, en octubre de 1821, algunos que sólo tenían una vaga idea de lo que Wollaston había dicho (e incluso Davy, que tendría que haberlo

sabido mejor) pensaron que Faraday se había limitado a demostrar que Wollaston tenía razón, o que estaba intentando robar los méritos de Wollaston por este trabajo. Esta situación desagradable pudo ser uno de los factores que indujeron a Davy a intentar impedir que Faraday se convirtiera en miembro de la Royal Society en 1824; sin embargo, el hecho de que Faraday fuera elegido por una mayoría tan abrumadora pone de manifiesto que otros científicos más perspicaces apreciaron plenamente la importancia y la originalidad de su obra. En efecto, este descubrimiento, que constituye el fundamento del motor eléctrico, hizo que el nombre de Faraday fuera conocido en toda Europa. Una muestra de lo importante que fue el descubrimiento y de que el cambio tecnológico estaba ya en marcha en aquella época nos la da el hecho de que sesenta años después de la demostración hecha por Faraday con un sólo cable que describía círculos en torno a un imán, los trenes eléctricos estuvieran ya circulando por Alemania, Gran Bretaña y Estados Unidos.



33. Faraday pronunciando una conferencia en la Royal Institution. *The Illustrated London News,* 1846.

Faraday hizo poco más en electricidad y magnetismo durante el resto de la década de 1820 (al menos no hubo avances reales cuando, de vez en cuando, hizo breves intentos de abordar el tema) pero llevó a cabo importantes trabajos en el ámbito de la química, siendo el primero en licuar el cloro (en 1823) y descubriendo el compuesto que actualmente llamamos benceno (en 1825), que es importante por tener la típica estructura de anillo que más tarde explicaría Kekulé y porque en el siglo XX resultó ser fundamental en las moléculas de la vida. Faraday también llegó a suceder a Davy como director del laboratorio de la Royal Institution en 1825, lo cual quiere decir que se ocupaba realmente de dirigir las tareas, y a finales de la década de 1820 incrementó los éxitos de la RI creando nuevas senes de conferencias divulgativas (muchas de las cuales impartió él

mismo) e instituyendo las conferencias de Navidad para niños. Lo asombroso no es que ya no se dedicara a estudiar tan detenidamente la electricidad y el magnetismo, sino que encontrara tiempo para dedicarse a cualquier tipo de investigación. Un indicio importante del modo en que la ciencia estaba cambiando es que Faraday, en 1826, escribiera lo siguiente:

> Para cualquier persona que desee dedicar una parte de su tiempo a los experimentos químicos es ciertamente imposible leer todos los libros e informes que se han publicado en relación con el tema que está investigando; el número de estas publicaciones es inmenso, y a ello se añade el trabajo de cribar las pocas verdades experimentales y teóricas que en gran cantidad de dichas publicaciones están mezcladas con muchos materiales carentes de interés, y con enormes dosis de imaginación y errores. Este trabajo es tal que muchos de los que intentan realizar el experimento se ven inducidos de inmediato a hacer una selección de lecturas y así, inadvertidamente, pasan por alto cosas que son realmente buenas.[9]

Se trataba de un problema que sólo podía ir a peor, y la respuesta de muchos de los mejores científicos (como ya hemos visto en el caso de Einstein) ha consistido a menudo en renunciar totalmente a «estar al día con la literatura». En 1855, una nueva dotación convirtió a Faraday en titular de la cátedra Fuller de química en la Royal Institution, cargo que se sumaba al de director de laboratorio —pero, para entonces, aunque ya tenía más de cuarenta años, había vuelto con éxito a dedicarse a los trabajos sobre electricidad y magnetismo, que iban a proporcionarle sus mayores logros.

La invención del motor eléctrico y de la dínamo

La cuestión que durante la década de 1820 había estado acosando persistentemente muchas mentes, incluida la de Faraday, era la siguiente: si una corriente eléctrica puede inducir una fuerza magnética en su proximidad, ¿puede un imán inducir una corriente eléctrica? En 1824 se había realizado un descubrimiento crucial, pero nadie lo había interpretado correcta-

mente hasta el momento en que Faraday retomó el problema en la década de 1830. François Arago había descubierto que, cuando la aguja magnética de una brújula estaba suspendida de un hilo sobre un disco de cobre y el disco giraba (como un CD girando en el reproductor) la aguja era desviada. Los físicos ingleses Peter Barlow (1776-1862) y Samuel Christie (1784-1865) habían observado un efecto similar, pero habían utilizado discos de hierro. Dado que el hierro es un material magnético, mientras que el cobre no lo es, el descubrimiento de Arago resultó más sorprendente y finalmente daría más que pensar. Actualmente explicamos el fenómeno como el resultado del movimiento relativo del disco conductor con respecto a la aguja magnética. Así se induce una corriente eléctrica en el disco y esta corriente, a su vez, produce una inducción magnética que afecta a la aguja. Esta explicación se debe exclusivamente a los trabajos realizados por Faraday durante la década de 1830.

En la época en que Faraday abordó el problema, en 1831, estaba claro que una corriente eléctrica que circulara por un cable enrollado en una hélice (se suele hablar de una bobina, aunque esto no es del todo exacto) haría que éste actuara como una barra imantada, con el polo norte en un extremo de la bobina y el polo sur en el otro. Si el cable estuviera enrollado alrededor de una barra de hierro, esta barra se convertiría en un imán al conectar la corriente. Para ver si este fenómeno funcionaba a la inversa, con una barra de hierro magnetizada que haría fluir la corriente en un cable, Faraday llevó a cabo un experimento utilizando un anillo de hierro de unos 15 centímetros de diámetro, donde el espesor del hierro propiamente dicho era de unos 2 centímetros. Enrolló dos bobinas de cable, en lados opuestos del anillo, y conectó una de ellas a una batería (magnetizando así el hierro a medida que la corriente fluía a través de la bobina) y la otra a un medidor sensible (un galvanómetro, basado en el efecto motor de la electricidad que Faraday había descrito en

1821) para detectar cualquier corriente que fuera inducida cuando el hierro se magnetizara. El experimento clave tuvo lugar el 29 de agosto de 1831. Faraday observó con asombro que la aguja del galvanómetro oscilaba en el momento en que la primera bobina se conectaba a la batería y luego volvía al cero. Cuando se desconectaba la batería, la aguja oscilaba de nuevo. Cuando fluía una corriente eléctrica «continua», produciendo una influencia magnética «continua» en el anillo, no se producía la corriente eléctrica inducida. Sin embargo, durante el breve momento en que la corriente eléctrica estaba «variando» (tanto subiendo, como bajando), y la influencia magnética variaba también (aumentando o disminuyendo), se producía una corriente inducida. En experimentos posteriores, Faraday pronto descubrió que era suficiente mover una barra imantada hacia dentro y hacia fuera de una bobina de cable para crear un flujo de corriente a través del cable. Había descubierto así que del mismo modo que la electricidad en movimiento (una corriente fluyendo por un cable) induce magnetismo en su proximidad, también un imán en movimiento produce una inducción eléctrica en su entorno. Se trataba pues de una situación claramente simétrica que explica el experimento de Arago y además el porqué del hecho de que nadie hubiera podido jamás inducir una corriente eléctrica utilizando imanes estáticos. Tras haber inventado ya el motor eléctrico, Faraday había inventado ahora el generador eléctrico, o la dinamo, que utiliza el movimiento relativo de bobinas de cable e imanes para generar corriente eléctrica. Este conjunto de descubrimientos, que se dieron a conocer en un informe leído ante la Royal Society el 24 de noviembre de 1831, situó a Faraday en el nivel más alto entre los científicos de su época.[10]

Estudios de Faraday sobre las líneas de fuerza

Faraday continuó llevando a cabo trabajos relacionados con la electricidad y la química (electroquímica), muchos de ellos con importantes aplicaciones industriales e inventó términos que ahora nos resultan familiares, como *electrolito, electrodo, ion, ánodo* y *cátodo*. También realizó una contribución crucial para el conocimiento científico de las fuerzas de la naturaleza, lo cual tiene una mayor relevancia en nuestra narración de la historia, aunque durante largo tiempo se guardó para sí mismo sus grandes ideas sobre estas importantes cuestiones. Utilizó por primera vez la expresión *líneas de fuerza* en un informe científico publicado en 1831, en el que desarrollaba este concepto a partir del experimento, de sobra conocido por nuestros escolares, consistente en diseminar pequeñas limaduras de hierro en un papel colocado sobre una barra imantada y observar que las limaduras forman unas líneas curvas que unen los dos polos. La idea de estas líneas, que parten de polos magnéticos o de partículas dotadas de carga eléctrica, es especialmente esclarecedora para visualizar la inducción magnética y la inducción eléctrica. Si un conductor se encuentra estacionario con respecto a un imán, está estacionario en relación con las líneas de fuerza y no fluye corriente alguna. Pero si se mueve con respecto al imán (o, lo que es igual, si el imán se mueve con respecto al conductor), el conductor al moverse corta las líneas de fuerza y es esto lo que genera la corriente en el conductor. Cuando un campo magnético crece a partir de cero, como sucede en el experimento del anillo de hierro, el modo en que Faraday enfocó este proceso contempla la existencia de líneas de fuerza que surgen del imán para adoptar sus posiciones y atraviesan la otra bobina del anillo, produciendo una breve oscilación de la corriente antes de que el trazado de las líneas de fuerza se estabilice.

Faraday vacilaba en cuanto a la publicación de estas teorías, pero deseaba exponerlas (algo parecido a la actitud posterior de

Darwin, cuando éste dudaba sobre la conveniencia de publicar su teoría de la selección natural, pero deseaba dejar clara su prioridad). El 12 de marzo de 1832, Faraday escribió una nota y la introdujo en un sobre sellado, fechado y avalado por testigos, depositándola en una caja fuerte en la Royal Society, con instrucciones para que el sobre se abriera después de su muerte. Un fragmento de la nota decía lo siguiente:

> Cuando un imán actúa sobre otro imán situado a una cierta distancia o sobre un trozo de hierro, la causa inductora (que, por el momento, llamaré «magnetismo») actúa gradualmente desde los cuerpos magnéticos y requiere tiempo para su transmisión… Me inclino por afirmar que la difusión de las fuerzas magnéticas desde un polo magnético se puede comparar con las vibraciones que produce una perturbación sobre la superficie del agua, o las producidas en el aire por fenómenos acústicos: es decir, me siento inclinado a pensar que la teoría de las vibraciones será aplicable a estos fenómenos, del mismo modo que lo es al sonido, y lo más probable es que se pueda aplicar también a la luz.

Ya en 1832, Faraday sugería que las fuerzas magnéticas necesitan cierto tiempo para desplazarse por el espacio (rechazando el concepto newtoniano de acción instantánea a distancia), proponiendo que se trataba de un movimiento ondulatorio, e incluso relacionándolo (aunque ligeramente) con la luz. Pero, dada su formación, Faraday carecía de la destreza matemática necesaria para llevar adelante sus teorías, y ésta es la razón por la que dudaba sobre la conveniencia de publicarlas. Por otra parte, dado que carecía de esa destreza matemática, se veía obligado a desarrollar analogías físicas para hacer comprender sus teorías y las presentó en público finalmente de esta manera. Sin embargo, no llegó a dar el paso hasta después de haber sufrido una grave crisis nerviosa ocasionada por el exceso de trabajo, a finales de la década de 1830. Una vez que se hubo recuperado de esta crisis,[11] quizá porque se dio cuenta de que no viviría eternamente y de que necesitaba dejar a la posteridad algo más que la nota sellada que guardaba en los sótanos de la Royal Society, Faraday aireó sus teorías por primera vez en la

Royal Institution durante uno de los llamados Discursos de las Veladas de los Viernes (que formaban parte del programa de conferencias que había puesto en marcha a finales de la década de 1820).

La fecha concreta fue el 19 de enero de 1844 y Faraday tenía 52 años de edad. El tema de su charla fue la naturaleza de los átomos, y no era Faraday en aquel momento el único que los consideraba como unos artilugios heurísticos, aunque estaba claro que había reflexionado sobre la cuestión más profundamente que muchos de sus opositores contemporáneos, que eran contrarios a la hipótesis atómica. En vez de considerar el átomo como un ente físico que estaba situado en el centro de una red de fuerzas y que era la causa de la existencia de aquellas fuerzas, Faraday planteó ante su audiencia que tenía más sentido considerar que la red de fuerzas era una realidad subyacente y que los átomos únicamente existían como concentraciones en las líneas de fuerza que constituían la red —según la terminología moderna, el campo de fuerzas. Faraday dejó claro que no estaba pensando solamente en la electricidad y el magnetismo. Haciendo un clásico «experimento mental», pidió a la audiencia que se imaginara que el Sol se encontraba solo en el espacio. ¿Qué sucedería si la Tierra apareciera de repente en su lugar, a su debida distancia del Sol? ¿Cómo «sabría» el Sol que la Tierra estaba allí? ¿Cómo respondería la Tierra a la presencia del Sol? Según el razonamiento que expuso Faraday, antes incluso de que la Tierra se colocara en su sitio, la red de fuerzas asociada con el Sol —el campo de fuerza— se extendería por todo el espacio, incluido el lugar en el que la Tierra estaba a punto de aparecer. Así pues, en cuanto la Tierra apareciera, «sabría» que el Sol estaba allí y reaccionaría ante el campo en el que se vería inmersa. Por lo que respecta a la Tierra, ese campo «es» la realidad que ella experimenta. Pero el Sol no «sabría» que la Tierra había llegado hasta que hubiera pasado el tiempo necesario

para que la influencia gravitatoria de la Tierra se desplazara a través del espacio y llegara al Sol. Faraday no tenía medio alguno para averiguar cuánto sería este tiempo, pero la influencia gravitatoria de la Tierra se extendería como las líneas de fuerza magnética que se difunden desde una bobina cuando ésta se conecta a una batería. Según Faraday, las líneas de fuerza magnéticas, eléctricas y gravitatorias llenaban el espacio y constituían la realidad con la que estarían interconectadas los entes aparentemente materiales que configuran el mundo. El mundo material, desde los átomos hasta el Sol y la Tierra (y más allá), era sencillamente el resultado de los nudos que se formaban en los distintos campos.

Estas teorías iban muy por delante de su época, hasta el punto que no produjeron impacto alguno en 1844, aunque describen claramente (sin matemáticas) el modo en que los físicos teóricos de hoy en día ven el mundo. Sin embargo, en 1846, Faraday volvió a hablar de su tema, las líneas de fuerza, durante otro Discurso de las Veladas de los Viernes. Esta vez expuso unas teorías que darían fruto un par de décadas después. Esta ocasión se debió en alguna medida a la suerte, aunque, desde luego, Faraday había invertido mucho tiempo en la elaboración de sus teorías. El orador con el que se había apalabrado una conferencia en la RI el 10 de abril de 1846, un tal John Napier, tuvo que anular el compromiso una semana antes de la fecha acordada, por lo que dejó a Faraday sin tiempo para encontrar algún sustituto que no fuera él mismo. Satisfecho de poder llenar el hueco, durante aquella velada Faraday dedicó la mayor parte del tiempo a resumir un trabajo realizado por Charles Wheatstone (1802-1875), que era catedrático de física experimental en el King's College de Londres y, entre otras cosas, había llevado a cabo tareas importantes e interesantes relacionadas con el sonido. Dado que Wheatstone mostraba siempre una notoria timidez ante la posibilidad de dar conferencias, Fara-

day sabía que le hacía un favor a su amigo si explicaba por él sus trabajos. Sin embargo, esto no llenaba la totalidad del tiempo disponible, por lo que al final de la conferencia Faraday añadió algo de sus propias teorías sobre líneas de fuerza. Sugirió que la luz se podía explicar en términos de vibraciones de las líneas de fuerza eléctricas, desechando la vieja teoría según la cual se necesitaba un medio fluido (el éter) para transportar las ondas luminosas:

> El punto de vista que me atrevo a exponer aquí considera la radiación, por lo tanto, como un tipo especial de vibración de las líneas de fuerza que, como se sabe, conectan las partículas y también las masas de materia. Mi teoría se atreve a descartar el éter, pero no las vibraciones.

A continuación Faraday señaló que el tipo de vibraciones a las que se refería eran transversales, unas ondulaciones de lado a lado que se desplazaban siguiendo las líneas de fuerza, no unas ondas ascendentes y descendentes como las del sonido. Además, insistió en que esta propagación se producía en el tiempo y aventuró la hipótesis de que la gravedad debía funcionar de un modo similar, necesitando también tiempo para desplazarse de un objeto a otro.

Faraday continuó en activo hasta los 60 años de edad y aún después como consejero o asesor del gobierno en cuestiones relativas a la educación científica y también en otras áreas. Fiel a sus principios sandemanianos, rechazó un título de nobleza y declinó en dos ocasiones la invitación para convertirse en presidente de la Royal Society —aunque es probable que estas ofertas le resultaran muy agradables al antiguo aprendiz de encuadernador—. En 1861, a los 70 años de edad y siendo consciente de que su capacidad mental decaía, presentó su dimisión en la RI, pero se le pidió que se quedara en el cargo (en gran medida honorífico) de superintendente. Mantuvo una cierta relación con la RI hasta 1865, pero su última conferencia dentro de los Discursos de la Velada de los Viernes tuvo lugar el 20 de

junio de 1862, el año en que él y Sarah abandonaron Albermarle Street y se mudaron a una casa en Hampton Court que les proporcionó graciosamente la reina Victoria a instancias del príncipe Alberto. Faraday falleció allí el 25 de agosto de 1867. Sólo tres años antes, James Clerk Maxwell había publicado su teoría completa del electromagnetismo, que se derivaba directamente de las teorías de Faraday sobre líneas de fuerza, y daba una explicación definitiva sobre la naturaleza de la luz como fenómeno electromagnético.

Medición de la velocidad de la luz

En la época en que Maxwell desarrollaba su teoría del electromagnetismo y de la luz, había aparecido otra prueba experimental decisiva (o, más bien, dos pruebas relacionadas entre sí). A finales de la década de 1840, el físico francés Armand Fizeau (1819-1896), la primera persona que estudió el efecto Doppler para la luz, había realizado la primera medición realmente precisa y fundamentada de la velocidad de la luz. Hizo pasar un haz luminoso a través de una rendija (como las aspilleras del muro de un castillo) abierta en una rueda dentada que giraba, de tal modo que la luz recorriera una trayectoria de 8 kilómetros entre la cima de la colina de Suresnes y Montmartre, para reflejarse en un espejo y volver, entrando a través de otra rendija de la rueda dentada. Esto sólo funcionaba si la rueda giraba a la velocidad adecuada. Sabiendo a qué velocidad giraba la rueda, Fizeau pudo medir cuánto tardaba la luz en hacer todo el recorrido y así consiguió una estimación de su velocidad con un error del 5 por 100 con respecto al valor de que se dispone actualmente. En 1850, Fizeau demostró también que la luz se desplaza más lentamente a través del agua que por el aire, siendo ésta una predicción clave para todos los modelos ondulatorios de la luz y dando así el carpetazo final al modelo corpuscu-

lar, que predecía que la luz viajaba más rápido por el agua que por el aire. Léon Foucault (1819-1868), que había trabajado con Fizeau sobre fotografía científica durante la década de 1840 (trabajando conjuntamente, obtuvieron las primeras fotografías de la superficie del Sol), estaba también interesado en medir la velocidad de la luz y llevó a cabo un experimento diseñado por Arago, y basado en una idea de Wheatstone, utilizando inicialmente un equipo instrumental que recibió de Arago cuando éste perdió la vista en 1850. En este experimento la luz rebotaba desde un espejo en rotación hasta un espejo fijo, y regresaba para rebotar de nuevo en el espejo rotatorio por segunda vez. La medida de la desviación del rayo luminoso indica el espacio que ha recorrido el espejo rotatorio en el giro realizado mientras la luz rebotaba en el espejo fijo, y así, sabiendo a qué velocidad giraba el espejo rotatorio, se podía calcular la velocidad de la luz. Invirtiendo el planteamiento que había seguido Fizeau, en 1850 Foucault utilizó este método, en primer lugar para demostrar (muy poco antes de que Fizeau lo hiciera) que la luz viaja más lentamente en el agua que en el aire, y después para medir la velocidad de la luz. Para 1862 había conseguido ya perfeccionar tanto este experimento, que llegó a calcular una velocidad de 298 005 km/s, con un error del 1 por 100 con respecto al valor actual, que es 299 792,5 km/s. Esta medición tan precisa de la velocidad de la luz fue de un valor incalculable en el contexto de la teoría de Maxwell.

Maxwell descendía, no de una, sino de dos familias escocesas prominentes, la de los Maxwell de Middlebie y la de los Clerk de Penicuik, vinculadas entre sí por dos matrimonios en el siglo XVIII. La herencia de las propiedades de Middlebie y Penicuik se dispuso de tal manera que ambas propiedades no pasaran a la misma persona: fueron las tierras de Middlebie (unos 1500 acres de terreno agropecuario cerca de Dalbeattie, en Galloway, en el extremo suroeste de Escocia) las que pasaron a ser

propiedad del padre de Maxwell, John Clerk, quien en consecuencia tomó el apellido Maxwell; la propiedad de Penicuik fue la herencia que correspondió al hermano mayor de John Clerk, George, quien como sir George Clerk fue diputado del Parlamento por Midlothian y prestó sus servicios al gobierno que encabezaba Robert Peel. La herencia de la propiedad de Middlebie no era como para echar las campanas al vuelo, ya que eran tierras pobres y ni siquiera había una casa adecuada para su propietario, por lo que John Clerk Maxwell residió la mayor parte del tiempo en Edimburgo, ejerciendo la abogacía de una manera poco metódica y más interesado por mantenerse al día en lo que estaba sucediendo con la ciencia y la tecnología (que, como ya hemos visto, era bastante importante en aquel Edimburgo de las primeras décadas del siglo XIX). Pero, en 1824, contrajo matrimonio con Francés Cay, se hizo construir una casa en Middlebie, se trasladó a vivir allí y comenzó a mejorar las tierras, después de retirar las piedras de los campos con el fin de prepararlos para los cultivos.

James Clerk Maxwell nació el 13 de junio de 1831, no en Galloway, sino en Edimburgo, adonde sus padres se habían trasladado para asegurarse de que el parto se realizara con las atenciones médicas adecuadas. Esto era especialmente importante, ya que la señora Maxwell tenía entonces 40 años y la criatura que había dado a luz un par de años antes, Elizabeth, había muerto al cabo de irnos pocos meses. James, que fue hijo único, se crió en la nueva casa, Glenlair, jugando con los niños del vecindario y adquiriendo un fuerte acento de Galloway, a pesar de tener unos antepasados algo aristocráticos. Dalbeattie era ciertamente un lugar todavía remoto cuando Maxwell era niño —aunque Glasgow estaba sólo a 110 kilómetros, recorrer esta distancia suponía entonces un día entero de viaje, y Edimburgo estuvo a dos días de distancia hasta que en 1837 se inauguró la línea ferroviaria Glasgow-Edimburgo—. Como se pue-

de deducir de esa necesidad de limpiar los campos de piedras antes de comenzar con los cultivos, la situación de la familia Maxwell se parecía más a la de una familia de pioneros de lo que entonces era el oeste de Estados Unidos, que a la de una familia inglesa que viviera a pocos kilómetros de Birmingham.

La madre de Maxwell murió de cáncer a los 48 años de edad, cuando el niño tenía sólo 8, y con ello desapareció la posibilidad de que alguien ejerciera alguna influencia para reprimir los modales rústicos que estaba adquiriendo el muchacho. Mantuvo una estrecha y feliz relación con su padre, quien fomentó el desarrollo intelectual y la curiosidad del muchacho por el mundo, pero al mismo tiempo tenía algunas costumbres curiosas, como diseñar sus ropas y sus calzados con un estilo que, aunque podía ser ciertamente práctico, no seguía los dictados de la moda. La única nube negra que se cernía sobre Glenlair era la presencia de un joven preceptor (poco más que un muchacho), que fue contratado para que se hiciera cargo de la formación de James más o menos en la época en que la madre de éste sufría su enfermedad terminal. Parece ser que este preceptor se dedicaba literalmente a meterle al chico los conocimientos a golpes, una situación que se prolongó durante unos dos años, ya que James se negó obcecadamente a quejarse a su padre por el trato que recibía. Pero, a los 10 años de edad, James fue enviado a la Edinburgh Academy para recibir una educación adecuada y allí, durante el curso, vivía con una de sus tías.

La aparición del muchacho en la Academia, donde llegó cuando el curso ya había empezado, vistiendo ropas toscas y hablando con un acento campesino cerrado, provocó la respuesta que era de esperar en sus compañeros, e incluso después de que algunas de las confrontaciones iniciales se hubieran resuelto a puñetazos, Maxwell no se pudo librar de ser apodado como *Dafty* («chiflado»), en alusión a lo extraño de su aspecto y de sus modales, pero sin que ello implicara en modo alguno la

atribución de falta de capacidad intelectual. Maxwell entabló una estrecha amistad con unos pocos compañeros y aprendió a soportar al resto. Disfrutaba cuando su padre iba a Edimburgo a visitarle, ya que a menudo le llevaba a ver demostraciones científicas —a los 12 años de edad presenció una demostración de fenómenos electromagnéticos y, en el mismo año, asistió con su padre a una reunión de la Royal Society de Edimburgo —. Al cabo de unos pocos años, Maxwell empezó a demostrar una destreza matemática inusual y a los 14 años de edad inventó un modo de dibujar un óvalo auténtico (no una elipse), utilizando un trozo de cuerda con la que había formado un bucle. Aunque esto resultaba muy original, no se trataba realmente de un avance revolucionario, pero gracias a las conexiones que tenía John Clerk Maxwell, consiguió que su trabajo se publicara en los *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, siendo éste su primer informe científico. En 1847, cuando tenía 16 años, que era entonces la edad a la que se ingresaba en una universidad escocesa, Maxwell se trasladó a la Universidad de Edimburgo, donde estudió durante tres años, pero se marchó de allí sin obtener la licenciatura, ingresando a continuación en Cambridge (al principio en la Peterhouse y luego, al final del primer trimestre, en el Trinity College, donde en otros tiempos había estado Newton). Allí se licenció en 1854, siendo el segundo de su promoción. Debido a que era un estudiante destacado, Maxwell se convirtió en miembro del Trinity College, pero permaneció allí sólo hasta 1856, año en que se convirtió en catedrático de filosofía natural del Marischal College de Aberdeen.

Este breve período como miembro de Cambridge duró justo lo suficiente para que Maxwell realizara dos trabajos importantes: uno de ellos consistió en desarrollar la teoría de la visión de los colores a partir del trabajo de Young, demostrando cómo unos pocos colores básicos se podían «mezclar» entre sí para engañar a los ojos de manera que éstos vieran muchos colores

diferentes (el experimento clásico para demostrarlo se realiza con una peonza pintada de distintos colores, de tal modo que, cuando la peonza gira, los colores se mezclan). El otro trabajo fue un importante informe titulado *On Faraday's Lines of Force*, en el que Maxwell recogía de manera completa todos los conocimientos sobre electromagnetismo existentes en aquella época y señalaba cuánto quedaba por descubrir, al mismo tiempo que establecía los fundamentos para sus estudios posteriores. El trabajo de Maxwell sobre la visión de los colores, que siguió desarrollando en años posteriores, fue el fundamento del método utilizado para hacer fotografías en color combinando tomas monocromáticas realizadas a través de tres filtros diferentes (rojo, verde y azul); este trabajo también es la base del sistema utilizado actualmente para la televisión en color y en los monitores de los ordenadores, así como en la impresoras de inyección de tinta en color.

Poco antes de que James recibiera el nombramiento para su plaza en Aberdeen, falleció su padre el 2 de abril de 1856; sin embargo, Maxwell no estuvo solo durante mucho tiempo, ya que en 1858 se casó con Katherine Mary Dewar, la hija del director del *college*, que era siete años mayor que él. No tuvieron hijos, pero Katherine trabajó como ayudante de su esposo en gran parte de sus trabajos. No obstante, las relaciones familiares no sirvieron de nada cuando, en 1860, el Marischal College se fusionó con el King's College en Aberdeen, formando el núcleo de lo que llegaría a ser la Universidad de Aberdeen. La institución resultante de la fusión necesitaba sólo un catedrático de filosofía natural y Maxwell tuvo que marcharse, ya que tenía menos antigüedad que su colega del King's College (que era sobrino de Faraday, aunque esto no tuvo nada que ver con la elección). El trabajo más valioso que Maxwell realizó en Aberdeen fue un estudio teórico sobre la naturaleza de los anillos de Saturno, en el cual demostró que los anillos debían de estar for-

mados por miríadas de pequeñas partículas, o pequeñas lunas, cada una de las cuales describiría su propia órbita alrededor del planeta, y que estos anillos no podían ser sólidos. Parece probable que el tratamiento matemático de estas numerosas partículas, necesario para probar sus afirmaciones, contribuyera a situar a Maxwell en el camino que le llevaría a realizar sus aportaciones a la teoría cinética, ya mencionadas en el capítulo anterior, después de que la lectura de la obra de Clausius suscitara su interés por el tema. A finales del siglo XX, cuando las sondas espaciales enviaron a la Tierra imágenes en color de los anillos de Saturno, en estas imágenes se utilizó la técnica fotográfica de Maxwell de los tres colores, para proporcionar una visión de las pequeñas lunas que había predicho el propio Maxwell — además, las sondas espaciales remitieron las imágenes a través de ondas de radio, otra predicción (como veremos más adelante) realizada también por Maxwell.

La teoría completa del electromagnetismo de James Clerk Maxwell

Desde Aberdeen, Maxwell y su esposa regresaron a Glenlair, donde James sufrió un brote de viruela, aunque se recuperó a tiempo para solicitar y conseguir la plaza de catedrático de filosofía natural y astronomía en el King's College de Londres. Fue allí donde terminó su gran trabajo sobre electromagnetismo, pero tuvo que dimitir del puesto en 1866 a causa de su mala salud —mientras cabalgaba, había pegado con la cabeza en la rama de un árbol y la herida le había provocado un grave ataque de erisipela, una enfermedad inflamatoria (como sabemos actualmente, debida a una infección por estreptococos) que se caracteriza por fuertes dolores de cabeza, vómitos y lesiones de color púrpura en la cara—. Cabe pensar que la virulencia de es-

te ataque pudo haber estado relacionada con el hecho de haber tenido anteriormente un brote de viruela.

La gran obra de Maxwell se había estado gestando durante unos diez años, desde que este científico comenzó a interesarse por las líneas de fuerza de Faraday. En la década de 1840, William Thomson había establecido una analogía matemática entre el modo en que fluye el calor a través de un sólido y las pautas que siguen las fuerzas eléctricas. Maxwell tomó como punto de partida estos estudios y buscó analogías similares, al tiempo que se comunicaba con Thomson manteniendo correspondencia mediante una serie de cartas que le ayudaron a clarificar sus teorías. De camino, Maxwell dio con un modelo intermedio basado en una idea que ahora nos parece muy extraña, según la cual las fuerzas eléctricas y magnéticas eran transmitidas por interacciones de vórtices, es decir, de torbellinos que giraban en un fluido que llenaba todo el espacio. Sin embargo, lo extraño de esta teoría no frenó el desarrollo de sus teorías, porque, como Maxwell comentó con mucho acierto, todas las imágenes físicas de este tipo son menos importantes que las fórmulas matemáticas con las que se describe lo que está sucediendo. En 1864, Maxwell escribió lo siguiente:

> Dado que existen personas con distintas mentalidades, la verdad científica debería presentarse de maneras diferentes, y tendría que considerarse igualmente científica tanto si se presenta en la forma consistente y con los vivos colores de una ilustración física, como si surge con el aspecto pálido y tenue de una expresión simbólica.[12]

Esto es casi lo más importante que Maxwell escribió en toda su vida. Cuando la ciencia (especialmente la teoría cuántica) se desarrolló en el siglo XX, fue quedando cada vez más claro que las imágenes y los modelos físicos que utilizamos para intentar explicar lo que sucede a escalas que van más allá del alcance de nuestros sentidos no son más que apoyos para nuestra imaginación, y que sólo podemos decir que en determinadas circuns-

tancias un fenómeno concreto se comporta «como si» fuera, por ejemplo, una cuerda en vibración, y no que «sea realmente» una cuerda en vibración (o, en cada caso, lo que corresponda). Como veremos más tarde, hay circunstancias en las que es bastante posible que diferentes personas utilicen modelos distintos para imaginarse el mismo fenómeno, aunque, basándose en las matemáticas, lleguen a las mismas predicciones sobre el modo en que el fenómeno va a responder ante ciertos estímulos. Avanzando sólo un poco más en esta historia, nos encontraremos con que, aunque es bastante correcto decir que la luz se comporta en muchos casos como una onda (especialmente cuando se desplaza de A a B), en otras circunstancias se comporta como una corriente de partículas diminutas, tal como Newton creía. No podemos afirmar que la luz «es» una onda, ni que «es» corpuscular; sólo podemos decir que en determinadas circunstancias es «como» una onda o «como» una partícula. Hay otra analogía, tomada también de la ciencia del siglo XX, que nos puede ayudar a clarificar esta cuestión. A veces me preguntan si creo que «existió realmente» el *Big Bang*. La mejor respuesta es que las pruebas de que disponemos son coherentes con la teoría según la cual el universo que vemos actualmente evolucionó a partir de un estado físico de gran densidad y calor (con el *Big Bang*) hace alrededor de 13 000 millones de años. En este sentido, sí creo que hubo un *Big Bang*. Pero no es el mismo tipo de creencia que la que puedo tener con respecto a que hay un enorme monumento a Horatio Nelson en Trafalgar Square. Este monumento lo he visto y lo he tocado, por eso creo que está allí. Desde luego, no he visto ni he tocado el *Big Bang*, pero el modelo del *Big Bang* es, entre todas las que conozco, la mejor manera de reflejar con una imagen cómo era el universo hace mucho tiempo y, además, esta imagen concuerda con las observaciones y los cálculos matemáticos existentes.[13] Éstas son cuestiones importantes que hemos de asimilar a medida que

nos movemos desde la ciencia clásica de Newton (que trata, en sentido amplio, de cosas que podemos ver y tocar) hacia las teorías del siglo XX (que se refieren, en cierto modo, a cosas que no se puede ver ni tocar). Los modelos son importantes y útiles, pero no son la verdad; en la medida en que existe una verdad científica, ésta reside en las ecuaciones, y eran ecuaciones lo que Maxwell encontró.

En 1861 y 1862, Maxwell publicó una serie de cuatro informes titulada *On Physical Lines of Force,* utilizando todavía la imagen de los vórtices, pero examinando, entre otras cosas, el modo en que las ondas se propagarían en tales circunstancias. La velocidad a la que se desplazaban dichas ondas dependía de las propiedades del medio, e introduciendo las propiedades adecuadas para que todo concordara con lo que ya se sabía sobre electricidad y magnetismo, Maxwell descubrió que el medio debía transmitir las ondas a la velocidad de la luz. Sus propias palabras dejan traslucir la emoción que le produjo este descubrimiento, tal como se puede leer en uno de los informes de 1862, donde utiliza cursiva para poner el énfasis en la importancia del descubrimiento: «Difícilmente podemos resistirnos a admitir la conclusión de que *la luz consiste en unas ondulaciones transversales del mismo medio que es causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos*».[14]

La luz es un tipo de perturbación electromagnética

Refinando el soporte matemático de su teoría, Maxwell pronto descubrió que podía abandonar los planteamientos de vórtices y de un medio con incidencia. La imagen física le había ayudado a construir las ecuaciones, pero una vez que éstas estuvieron construidas, se quedaron solas —la analogía obvia se haría con una gran catedral medieval, construida con ayuda de un desvencijado andamiaje de madera, para sostenerse luego

por sí misma en todo su esplendor, sin soportes externos, una vez que se ha retirado el andamiaje—. En 1864, Maxwell publicó el más importante de todos sus informes, «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field» («Teoría dinámica del campo electromagnético»), que compendiaba todo lo que se puede decir, desde un punto de vista clásico, sobre electricidad y magnetismo en un conjunto de cuatro ecuaciones, conocidas actualmente como las ecuaciones de Maxwell. Cualquier problema relacionado con la electricidad y el magnetismo se puede resolver utilizando dichas ecuaciones, excepto aquellos casos en los que hay que tener en cuenta ciertos fenómenos cuánticos. Dado que con un solo conjunto de ecuaciones era ya posible resolver todos los problemas relativos a electricidad y magnetismo, Maxwell había satisfecho la posibilidad que ya indicaban los trabajos de Faraday en cuanto a unificar dos fuerzas en un solo paquete; donde antes había electricidad y magnetismo, a partir de entonces existía un solo campo: el campo electromagnético. Por todo esto es por lo que Maxwell está situado junto a Newton en el panteón de los grandes científicos. Entre ambos, con las leyes de Newton y su teoría de la gravedad, y las ecuaciones de Maxwell, se explica todo lo que se conocía en física a finales de la década de 1860. Sin lugar a dudas, el logro de Maxwell fue la aportación más importante de la física desde los *Principia* de Newton. Además, había algo especialmente suculento: las ecuaciones de Maxwell contienen una constante, *c*, que representa la velocidad a la que se desplazan las ondas electromagnéticas, y esta constante está relacionada con las propiedades eléctricas y magnéticas medibles de la materia. En los experimentos realizados para medir dichas propiedades, como afirmó Maxwell, «el único uso que se hizo de la luz… fue para ver los instrumentos». Pero el número que se obtuvo a partir de estos experimentos (el valor de *c*), dentro del margen de

error experimental, fue exactamente el de la velocidad de la luz (en una determinación que era buena para la época).

> Esta velocidad se acerca tanto a la de la luz que, según parece, tenemos poderosas razones para concluir que la luz en sí misma (incluido el calor irradiado y otras radiaciones, si las hubiera) es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan a través del campo electromagnético según las leyes del electromagnetismo.[15]

La referencia a «otras radiaciones» es significativa; Maxwell predijo que podían existir tipos de ondas electromagnéticas con longitudes de onda mucho mayores que la de la luz visible —lo que llamamos actualmente ondas de radio—. A finales de la década de 1880, el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) llevó a cabo unos experimentos que confirmaron la existencia de estas ondas, demostrando que se desplazaban a la velocidad de la luz y que, como la luz, podían ser reflejadas, refractadas y difractadas. Fue una prueba más de que la teoría de la luz de Maxwell era correcta.

Aunque las ecuaciones y las pruebas experimentales son irrefutables, es muy útil, como Maxwell indicó, disponer de un modelo lleno de colorido con el que ayudar a la reflexión —siempre que recordemos que el modelo no es la realidad, sino simplemente un artificio construido para hacemos una imagen de lo que sucede—. En este caso, una manera de imaginamos la propagación de la luz (o de otra radiación electromagnética) es pensar en una cuerda estirada que se puede menear desde un extremo. Recordemos que, según el descubrimiento de Faraday, un campo magnético en movimiento (o variable) crea un campo eléctrico, y un campo eléctrico en movimiento crea un campo magnético. Si se suministra energía sacudiendo la cuerda estirada (lo cual es equivalente a suministrar energía a un campo electromagnético haciendo que una corriente fluya, primero en una dirección y luego en la confiaría a través de un cable largo o de un sistema de antenas), es posible enviar ondula-

ciones (u ondas) a lo largo de la cuerda. Esta se agita hacia arriba y hacia abajo para producir ondas verticales, y hacia los lados para generar ondas horizontales. Una de las cosas que nos dicen las ecuaciones de Maxwell es que las ondas eléctricas y magnéticas equivalentes que se producen dentro de una onda electromagnética forman entre sí ángulos rectos —si, por ejemplo, las ondas eléctricas son verticales, entonces las ondas magnéticas son horizontales. En cualquier punto situado a lo largo de la trayectoria de la onda (o sea, a lo largo de la cuerda), el campo eléctrico está cambiando constantemente a medida que pasan las ondulaciones. Pero esto significa que debe haber un campo magnético que varía constantemente, producido por un campo eléctrico. Por lo tanto, en cada punto situado a lo largo de la trayectoria de la onda (a lo largo de la cuerda) hay un campo magnético que cambia constantemente y produce un campo eléctrico que cambia constantemente. Las ondas eléctricas y las magnéticas avanzan juntas al paso, como en un haz de luz (o como en las ondas de radio), transportando una energía que se suministra en la fuente de la radiación.

Con su gran obra ya finalizada —la última gran aportación a la ciencia clásica, dentro de la tradición newtoniana— Maxwell, que en 1866 sólo tenía 35 años, se instaló cómodamente en Galloway, manteniéndose en contacto por correspondencia con sus numerosos amigos científicos y dedicándose a escribir un gran libro, su *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Tratado de electricidad y magnetismo*), que se publicó en dos volúmenes en 1873. Rechazó varias ofertas para ocupar prestigiosos cargos académicos, pero cayó en la tentación de regresar a Cambridge en 1871, donde solicitó la primera cátedra Cavendish de física experimental y, lo que era mucho más importante, instaló y dirigió el Laboratorio Cavendish.[16] Este laboratorio se inauguró en 1874. Maxwell vivió todavía lo suficiente para poner su sello en la actividad del laboratorio, que llegó a ser el centro de in-

vestigación más importante en relación con los nuevos descubrimientos logrados en la física durante las décadas de revolución científica que iban a llegar inmediatamente. Pero Maxwell enfermó gravemente en 1879 y falleció el 5 de noviembre de aquel año a causa de la misma enfermedad que había matado a su madre, el cáncer, y a la misma edad, 48 años. Aquel mismo año, el 14 de marzo, el que iba a ser el primero en darse cuenta de las implicaciones de las ecuaciones de Maxwell nacía en Ulm, Alemania. Se trataba, por supuesto, de Albert Einstein.

La relación de Einstein con el mundo del electromagnetismo comenzó, en cierto modo, el año siguiente a su nacimiento, cuando la familia se trasladó a Munich. Allí su padre, Hermann, se asoció con su tío, Jakob, para montar una empresa de ingeniería eléctrica (con la ayuda de los fondos suministrados por la familia de la madre de Albert, Pauline) —un buen ejemplo de cómo los descubrimientos de Faraday habían encontrado, ya entonces, una aplicación práctica—. Técnicamente la empresa fue un éxito, llegando en un momento dado a emplear a más de 200 personas y a instalar luz eléctrica en pequeñas ciudades. Pero andaban siempre escasos de fondos y finalmente perdieron las empresas que acabarían siendo los gigantes de la industria eléctrica alemana, entre ellas Siemens y la Edison Company alemana. Fueron a la quiebra en 1894. Buscando un entorno económico más conveniente, los dos hermanos se trasladaron al norte de Italia, donde su empresa había realizado anteriormente trabajos por contrato, pero allí no consiguieron alcanzar más que un éxito modesto; este traslado les obligó a dejar en Alemania a Albert, que entonces tenía 15 años de edad, para que terminara su educación dentro del sistema educativo alemán.

Esto no fue una buena idea. Albert era un joven inteligente y con una mentalidad independiente que no encajaba con la rígida disciplina que se imponía dentro del sistema educativo de su

país natal, recientemente unificado y gobernado por una tradición militarista prusiana que establecía el servicio militar obligatorio para todos los hombres jóvenes. No está claro cómo consiguió Einstein provocar que le sacaran del *Gymnasium* («instituto»); según algunas informaciones, fue expulsado después de un período de rebeldía, mientras que según otros fue él mismo quien lo organizó todo por su cuenta. En cualquier caso, convenció al médico de la familia de que sufría un trastorno nervioso a causa del cual precisaba reposo total, y provisto del certificado correspondiente se marchó para reunirse con la familia (sus padres y su hermana menor Maja, ya que no tenía más hermanos), llegando a Italia a principios de 1895. Tras renunciar a su nacionalidad alemana, que era el único modo seguro de evitar el servicio militar, pasó algún tiempo trabajando en el negocio familiar, y más tiempo aún participando de los deleites que ofrecía Italia, antes de realizar los exámenes de ingreso para acceder a la Escuela Politécnica Federal de Suiza (Eidgenössische Technische Hochschule, o ETH) de Zurich, donde consiguió obtener una licenciatura —no era un título tan prestigioso como los de las grandes universidades alemanas, pero al menos era un título—. En el otoño de 1895, a Einstein le faltaban 18 meses para tener la edad a la que los estudiantes solían ingresar en la ETH (18 años), y además había abandonado el *Gymnasium* sin obtener diploma alguno, salvo una carta de un profesor en la que se certificaba su destreza en matemáticas. Dadas las circunstancias, no nos sorprende que suspendiera en el examen de ingreso, pero seguramente fue un duro golpe para un chico tan engreído como era Einstein. Tuvo que pasar un curso entero en una escuela secundaria suiza, en Aaru, al sur de Zurich, para conseguir finalmente ingresar en la ETH en 1896. Fue uno de los años más felices de su vida, durante el cual estuvo alojado en la casa de Jost Winteler, el director del instituto al que asistía, y entabló amistad para toda la vida con la familia

Winteler (más tarde Maja, la hermana de Albert, se casó con el hijo de Jost Winteler, Paul).

En Zurich, dedicado oficialmente al estudio de las matemáticas y la física, Einstein disfrutó plenamente de la vida (lo cual al final desembocó en dejar embarazada a su novia Mileva Maric; el hijo ilegítimo fue dado en adopción) y trabajó lo mínimo necesario para satisfacer a sus profesores, mientras leía y estudiaba muchos temas al margen del programa oficial de estudios. Confiando más que nunca en sus propias capacidades, esperaba hacer brillantemente los exámenes finales y conseguir un empleo en algún puesto modesto dentro de la propia ETH o en alguna universidad. Efectivamente, hizo bien los exámenes, licenciándose en julio de 1900, aunque no de forma brillante — ciertamente no con la brillantez suficiente para contrarrestar el rechazo de los profesores a dar un empleo a alguien que por su temperamento no parecía capaz de trabajar duro y con seriedad. Así es como Albert Einstein llegó en 1905 a la situación de estar trabajando en una oficina de patentes en Berna, después de haberse casado con Mileva en 1903, y con un hijo pequeño, Hans Albert, nacido el 14 de mayo de 1904. El segundo hijo legítimo, Eduard, nació el 28 de julio de 1910.

La primera piedra de la teoría especial de la relatividad de Einstein, publicada en 1905, fue la constancia de la velocidad de la luz. En la época en que desarrolló su teoría, ya había pruebas experimentales de que la velocidad de la luz es siempre la misma, independientemente de que la persona que realice la medición esté en movimiento. Pero es importante tener en cuenta que Einstein, aunque conocía estos trabajos, no estuvo influido por ellos. Lo que caracterizó su planteamiento del problema fue el hecho de que partió de las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones contienen una constante, c, que se identifica con la velocidad de la luz. Por lo que respecta a la determinación del valor de c, en las ecuaciones no se contempla que haya

que tener en cuenta el modo en que el observador se mueve con relación a la luz. Según las ecuaciones de Maxwell, todos los observadores medirán la misma velocidad de la luz, *c*, tanto si están estacionarios, si se mueven hacia la fuente de luz, o si se están alejando de dicha fuente (o, incluso, si se están desplazando con cualquier ángulo a través del haz luminoso). Esto contradice al sentido común y al modo en las velocidades se suman o restan según lo establecido en la mecánica newtoniana. Si un vehículo se mueve hacia nosotros por una carretera recta a 100 km por hora y circulamos en la dirección contraria a 50 km por hora, el vehículo se está aproximando a nosotros con una velocidad relativa de 150 km por hora; si circulamos a 50 km por hora y el coche que va por delante en la misma dirección lleva una velocidad de 100 km por hora, entonces este coche circula a una velocidad relativa de 50 km por hora con respecto a nosotros. Pero, según las ecuaciones de Maxwell, en cualquiera de las dos situaciones la velocidad de la luz procedente de los faros delanteros o de las luces traseras del otro vehículo es siempre *c*, tanto con respecto a nosotros «como» en relación al conductor del otro vehículo (y, de hecho, también con respecto a cualquier persona que esté al borde de la carretera). A poco que pensemos, está claro que las leyes del movimiento de Newton y las ecuaciones de Maxwell no pueden cumplirse al mismo tiempo. La mayoría de los que reflexionaron sobre esto antes de 1905 supusieron que tenía que haber algo que no era del todo cierto en la teoría de Maxwell, es decir, en lo último que había entrado en el saco. Einstein, que siempre fue un iconoclasta, tuvo la temeridad de sopesar el caso alternativo —que Maxwell tenía razón y Newton, al menos en este caso concreto, estaba equivocado—. Esta fue la base de su gran idea. Sin embargo, vale la pena examinar también las pruebas experimentales, que confirman plenamente el acierto de Maxwell.

Aunque Faraday había intentado en 1846 «descartar la existencia del éter», este concepto se negaba a desaparecer, ya que en un artículo publicado en la *Encyclopaedia Britannica* en 1878 (sólo un año antes de su muerte), el propio Maxwell había propuesto un experimento para medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter (por utilizar una expresión más moderna), utilizando haces de luz para realizar el experimento. Este consistía en dividir en dos un rayo de luz y enviar cada uno de los rayos resultantes a realizar un viaje entre dos espejos, con un conjunto de espejos alineado en la dirección del movimiento de la Tierra a través del espacio (y, supuestamente, a través del éter) y el otro formando ángulos rectos con el primero. Después de rebotar entre sus respectivos espejos, los rayos de luz podían reunirse de nuevo e interferir mutuamente. Si el experimento se organizaba de tal modo que cada rayo de luz cubriera la misma distancia, entonces, debido al movimiento de la Tierra a través del éter, deberían invertir tiempos diferentes en recorrer sus trayectorias, y acabarían por desfasarse el uno con respecto al otro, produciendo un patrón de interferencias parecido al que se observaba en el experimento de la doble rendija. El desafío que suponía llevar a cabo tal experimento, con la precisión requerida para comprobar esta predicción, fue asumido por el físico americano Albert Michelson (1852-1931), al principio en solitario, mientras trabajaba en el laboratorio de Hermann von Helmholtz en Berlín en 1881, y posteriormente en colaboración con Edward Morley (1838-1923) en Ohio en 1887. Descubrieron, con una gran precisión, que no había pruebas de que la Tierra se moviera con relación al éter —o, por decirlo de otra manera, la velocidad de la luz tiene el mismo valor cuando se mide en la dirección del movimiento de la

Tierra y cuando se mide formando ángulos rectos con dicha dirección del desplazamiento de nuestro planeta—. De hecho, es la misma en cualquier dirección. Podían dar un giro a los instrumentos sin que se observara variación alguna, del mismo modo que podían realizar el experimento a distintas horas del día (es decir, en diferentes estadios de la rotación terrestre), podían realizarlo en distintos momentos del año (es decir, en diferentes puntos de la órbita de la Tierra alrededor del Sol), y siempre se obtenía la misma respuesta: no se producía interferencia alguna entre los dos rayos de luz.

Michelson, que tenía una especie de obsesión por la luz, ideó y puso en práctica repetidamente distintos experimentos cada vez más perfeccionados para medir la velocidad de la luz (por supuesto, el experimento Michelson-Morley no tenía por qué medir la velocidad real de la luz, ya que sólo buscaba «diferencias» entre los dos rayos de luz). Michelson recibió el Premio Nobel en 1907 por la excelente precisión de todos sus trabajos, pero incluso entonces estaba todavía lejos de dar por zanjado el tema de la luz. En el último trabajo que llevó a cabo, en 1926, cuando tenía ya 73 años de edad, hizo que la luz efectuara un recorrido de ida y vuelta entre las cimas de dos montañas de California. Determinó su velocidad con un valor de 299 796 ± 4 km/s, coincidiendo, dentro de los márgenes de error experimental, con el mejor valor conocido actualmente, que es de 299 792,458 km/s. En realidad, el valor actual se «define» hoy en día como la velocidad de la luz, lo que significa que la longitud estándar del metro queda especificada mediante estas mediciones.[17]

Muy poco después de que Michelson y Morley informaran sobre sus resultados experimentales definitivos, el matemático y físico irlandés George Fitzgerald (1851-1901), que trabajaba en el Trinity College, en Dublín, propuso una explicación. Fitzgerald había sido uno de los primeros científicos que se toma-

ron en serio las ecuaciones de Maxwell y desarrolló el tema de lo que actualmente llamamos ondas de radio antes de que Hertz llevara a cabo sus experimentos. En 1889 Fitzgerald sugirió que el hecho de que el experimento de Michelson-Morley no consiguiera medir ningún cambio en la velocidad de la luz, independientemente del modo en que los instrumentos estuvieran orientados con respecto al movimiento de la Tierra a través del espacio, se podría explicar si todo el instrumental (en realidad, toda la Tierra) se encogiera o contrajera en una pequeñísima medida en la dirección de su movimiento —en una cantidad que dependería de su velocidad y podría calcularse exactamente a partir del hecho de que el experimento diera resultado negativo. Esta misma idea fue planteada de manera independiente en la década de 1890 por el físico holandés Hendrik Lorentz (1853-1928), que trabajó en Leiden y desarrolló la teoría de una forma más completa (en gran medida porque tuvo la buena suerte de sobrevivir a Fitzgerald, que murió joven a causa de una úlcera de estómago ocasionada por el exceso de trabajo). Lorentz consiguió en 1904 la forma definitiva de las ecuaciones de lo que se conoce como transformación de Lorentz. Haciendo caso omiso de la prioridad histórica, actualmente conocemos el efecto de contracción como contracción de Lorentz-Fitzgerald.

Albert Einstein: la teoría especial de la relatividad

Estos trabajos de Lorentz se consideran a veces algo así como un precedente de la teoría especial de la relatividad de Einstein, sugiriendo implícitamente que todo lo que Einstein hizo fue poner los puntos sobre las íes. Pero esto está lejos de ser así. El tipo de contracción que Fitzgerald y Lorentz previeron se refería a que las partículas cargadas eléctricamente (átomos) de una sustancia determinada se acercaban cada vez más

entre sí a medida que la fuerza de atracción mutua aumentaba a causa de su movimiento —aunque ahora sepamos que esta teoría es errónea, entonces no era una idea del todo descabellada, dados los descubrimientos de Faraday sobre el modo en que el movimiento afectaba a la electricidad y al magnetismo. Por otro lado, partiendo de principios básicos, basados en el hecho de que las ecuaciones de Maxwell determinan un valor único para la velocidad de la luz, Einstein desarrolló unas ecuaciones que eran matemáticamente idénticas a las ecuaciones de la transformación de Lorentz, pero que consideraban que era el propio espacio ocupado por un objeto el que se contraía, en la dirección del movimiento de dicho objeto, con respecto a un observador. Estas ecuaciones expresan también la dilatación del tiempo (los relojes en movimiento se mueven más lentamente, en relación con el tiempo medido por un observador que se encuentra en reposo) y un aumento en la masa de los objetos que están en movimiento. La teoría especial de la relatividad pone de manifiesto que ningún objeto que comience a moverse a una velocidad inferior a la de la luz puede acelerarse hasta sobrepasar la velocidad de la luz (una forma de reflexionar sobre esto es tener en cuenta que su masa se volvería infinita al llegar a la velocidad de la luz, de tal forma que se necesitaría una cantidad infinita de energía para hacer que el objeto se moviera más rápido). Además, en relación con el modo en que la masa depende de la velocidad, esta teoría pone de manifiesto la equivalencia de masa y energía en la fórmula más famosa que existe en la ciencia: $E = mc^2$.

Pero ¿con respecto a quién son relativas estas mediciones? La otra característica fundamental de la teoría especial de la relatividad, junto con el valor constante de la velocidad de la luz, es que no existe en el espacio un estado de reposo preferente. Einstein vio que no había en el universo un marco de referencia preferente —ningún «espacio absoluto» con respecto al cual

se pueda medir el movimiento—. Todo movimiento es relativo (de ahí el nombre de la teoría) y cualquier observador que no esté sometido a una aceleración puede considerarse a sí mismo en reposo y medir cualquier otro movimiento en relación con su marco de referencia. Esta teoría es «especial» en el sentido de que es restringida: se trata de un caso especial en el que no se consideran las aceleraciones. Todos los observadores que se muevan a velocidades constantes los unos en relación con los otros tienen el mismo derecho a decir que se encuentran en reposo y a medir cualquier movimiento en relación con ellos mismos. En las ecuaciones existe una simetría que resulta cómoda y esencial, lo cual significa que varios observadores que se encuentren en distintos marcos de referencia (moviéndose los unos en relación con los otros) obtienen las mismas respuestas en sus experimentos cuando comparan sus anotaciones, a pesar de que disientan con respecto al modo en que han conseguido dichas respuestas. Por ejemplo, si observamos una nave espacial que viaje a una gran velocidad (grande en proporción a la velocidad de la luz) hacia una estrella situada a 10 años luz de distancia, si la nave no se desplaza más rápidamente que la luz, nos parecerá que el tiempo que tarda la nave en realizar este recorrido es menos de 10 años «según los relojes situados en la nave espacial», ya que los relojes que se encuentran en movimiento andan más despacio. A la tripulación de la nave espacial le parecerá también que el viaje ha durado el mismo tiempo que nosotros hemos calculado; sin embargo, dirán que sus relojes funcionan como han funcionado siempre y que su viaje se ha acortado porque se ha contraído el espacio que les separaba de aquella estrella distante, a causa del movimiento relativo de todas las estrellas del universo «que se desplazaban» con respecto a la nave espacial, que ellos tienen derecho a considerar en reposo. Si cualquier observador a ve que el reloj del observador B se está atrasando y que sus reglas de medir se han

contraído, entonces el observador B percibe que los relojes y las reglas de medir del observador A están afectados exactamente de la misma manera y en la misma proporción, sin que ninguno de ellos constate nada extraño en sus propios instrumentos de medir. Un curioso resultado de todo esto es que para cualquier objeto que viaje a la velocidad de la luz el tiempo permanece inmóvil. Desde el punto de vista de un fotón (un cuanto de luz, tal como explicaremos en el capítulo 13) no se tarda absolutamente nada en recorrer los 150 millones de kilómetros que separan a la Tierra del Sol. Desde nuestro punto de vista, esto se debe a que cualquier reloj que viaje con el fotón permanecería parado; desde el punto de vista del fotón, se debe a que a unas velocidades tan altas (recordemos que el fotón puede considerarse a sí mismo como un objeto en reposo), el espacio que separa el Sol y la Tierra se contrae hasta desaparecer, por lo que obviamente no se tarda tiempo en recorrerlo. Por supuesto, aunque tales deducciones puedan parecer extrañas, es de una importancia crucial el hecho de que las predicciones de la teoría especial de la relatividad hayan quedado confirmadas muchas veces mediante experimentos (por ejemplo, utilizando haces de partículas que se aceleran hasta conseguir que su velocidad esté muy cerca de la velocidad de la luz) y con una precisión de muchas cifras decimales. Esta es la razón por la que es una teoría, y no se ha quedado en una mera hipótesis. Sin embargo, estos efectos sólo se ponen de manifiesto cuando los objetos se mueven a una velocidad muy próxima a la de la luz, y a esto se debe que en la vida cotidiana no seamos conscientes de ellos y, en consecuencia, no nos parezcan lógicos. Pero, no obstante, se ha comprobado que son reales.

MINKOWSKY: LA UNIÓN GEOMÉTRICA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO SEGÚN LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

Sería un error pensar que los contemporáneos de Einstein no llegaron a comprender en 1905 la teoría especial de la relatividad. El hecho de que Michelson recibiera el Premio Nobel un par de años más tarde es un reflejo significativo del hecho de que muchos físicos comprendieron tanto la importancia de las ecuaciones de la transformación de Lorentz, como la de los trabajos de Einstein. Sin embargo, es cierto que las teorías de Einstein no comenzaron a producir realmente un gran impacto, y que las importantes diferencias entre su obra y la de Lorentz y Fitzgerald no se apreciaron plenamente, hasta después de 1908, cuando el antiguo profesor de Einstein, Minkowski (el que había calificado a Einstein de «vago redomado»), presentó la idea no sólo en términos de ecuaciones matemáticas, sino también en términos de geometría cuatridimensional, la geometría del espacio y el tiempo (fusionados actualmente como el espacio-tiempo). En una conferencia que dio en Colonia aquel año, Minkowski (que había nacido en 1864 y murió a causa de las complicaciones de un ataque de apendicitis sólo un año después de pronunciar esta conferencia) decía lo siguiente:

> Por consiguiente, el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse hasta convertirse en meras sombras, y sólo algún tipo de unión de ambos preservará la existencia de una realidad independiente.

Aunque Einstein, al principio, no vio con agrado esta geometrización de sus teorías, como veremos más adelante, fue precisamente esta unión geométrica del espacio y el tiempo lo que conduciría a la teoría que se considera en general como su mayor logro: la teoría general de la relatividad.

Después de 1905, la física ya no volvería a ser lo mismo (y todavía tenemos que comentar lo que yo considero el logro más importante de Einstein durante su *annus mirabilis*: el trabajo por el que recibió el Premio Nobel y que estableció los fundamentos de la teoría cuántica). En el siglo XX la física fundamental se desarrollaría por caminos que nunca podrían haber

imaginado los pioneros clásicos, como Newton o incluso Maxwell. Sin embargo, en la ciencia clásica (y en particular en la física clásica) estaba todavía por llegar un gran triunfo, que surgió cuando ciertas teorías que esencialmente eran anteriores a 1905 se aplicaron al mayor rompecabezas que se ha planteado a escala humana: la naturaleza del origen y de la evolución de la Tierra.

Capítulo 12

EL ÚLTIMO GRAN TRIUNFO DE LA CIENCIA CLÁSICA

El último gran triunfo de la ciencia clásica dependía de un descubrimiento que, visto retrospectivamente, pertenece al mundo postclásico del siglo XX («postclásico» en el sentido científico, no en el literario o artístico, significa que la labor científica está basada en la teoría de la relatividad y en la mecánica cuántica). El descubrimiento al que nos referimos es el de la radioactividad (que en realidad se hizo en el siglo XIX). La radioactividad proporcionó una fuente de calor que pudo evitar que el interior de la Tierra se enfriara convirtiéndose en una masa sólida, un bloque inerte, en la escala temporal que requerían las teorías uniformitarianistas o actualistas desarrolladas por Lyell y sus predecesores. Serían necesarias las teorías de la relatividad y la física cuántica para avanzar, a partir del descubrimiento de la radioactividad, hasta una explicación del fenómeno y el conocimiento de cómo la conversión de masa en energía mantiene el brillo de las estrellas. Pero, al igual que Galileo pudo estudiar la manera en que los péndulos oscilan y las bolas bajan por planos inclinados sin saber cómo funciona la gravedad, todo lo que aquellos geofísicos necesitaban saber sobre la radioactividad era que ésta proporcionaba la manera de mantener caliente el interior de la Tierra —que existía una fuente de energía para alimentar los procesos físicos que han configurado la superficie del planeta durante un inmenso pe-

ríodo de tiempo y continúan haciéndolo actualmente—. Gracias a este conocimiento, pudieron desarrollar la geología hasta llegar a la geofísica, explicando así el origen de los continentes y de las cuencas oceánicas, la aparición de terremotos, la formación de los volcanes y las montañas, la erosión de la tierra, y muchas otras cosas más; todo esto lo explicaron mediante unos razonamientos científicos que podrían haber comprendido perfectamente Isaac Newton o Galileo Galilei, no digamos William Thomson o James Clerk Maxwell.

CONTRACCIONISMO: ¿NUESTRO PLANETA SE ESTÁ ARRUGANDO?

A pesar de la importancia que tuvo la influencia de Lyell (especialmente en el mundo angloparlante y sobre todo en Charles Darwin), no deberíamos quedamos con la idea de que el uniformitarianismo borró todo lo anterior después de la publicación de sus *Principles of Geology* o de que la mayoría de los geólogos del siglo XIX se interesaron demasiado por el debate relativo a las causas físicas de la configuración del globo terráqueo. En realidad ni siquiera podemos decir que hubiera un debate; hubo distintos científicos que propusieron distintos modelos, cada uno de los cuales tenía sus partidarios, pero los rivales no se reunieron para discutir los méritos de los modelos contrapuestos ni entraron de lleno en ningún tipo de confrontación a través de las publicaciones impresas. La primera tarea, que fue en gran medida el trabajo de vanguardia durante todo el siglo XIX, consistió en realizar el trabajo de campo para poner en orden los estratos y proporcionar a los geólogos una cronología *relativa* con la que poder funcionar, de tal modo que se supiera qué rocas eran más antiguas y cuáles más recientes. A medida que la investigación iba haciendo surgir teorías sobre el origen de aquellos estratos, se mantenían las tendencias del uniformitarianismo o actualismo, y se pensaba de forma gene-

ralizada que, aunque en el pasado hubiera actuado el mismo tipo de fuerzas que actúa en la actualidad (por ejemplo, terremotos y volcanes), dichas fuerzas podían haber sido más poderosas en el pasado, cuando la Tierra era más joven y supuestamente estaba más caliente. El uniformitarianismo de Lyell decía que los continentes se podían convertir en fondos marinos, y que los fondos oceánicos ascendían para formar continentes; pero, otra escuela de pensamiento, también actualista, conocida como el permanentismo, sostenía que los continentes siempre habían sido continentes y los océanos siempre habían sido océanos. Los permanentistas eran especialmente fuertes en Norteamérica, donde James Dana (1850-1892), catedrático de historia natural y de geología en la Universidad de Yale, era su defensor más destacado. Ligaba esta hipótesis con la idea de que la Tierra se estaba encogiendo gradualmente, contrayéndose a medida que se enfriaba, y que las cordilleras como la de los montes Apalaches habían surgido en realidad porque la corteza de la Tierra se arrugaba al contraerse (una teoría que no dejaba de ser razonable, dados los conocimientos de la época).

En Europa, la teoría del contraccionismo se desarrolló siguiendo líneas diferentes, como una variante del catastrofismo. Esta teoría culminó, durante las décadas finales del siglo XIX, en una síntesis de teorías más antiguas desarrollada por Eduard Suess (1831-1914), que nació en Londres como hijo de un comerciante alemán de lanas, pero se trasladó con su familia, siendo aún un niño, primero a Praga y luego a Viena, donde finalmente llegó a ser catedrático de geología en la universidad. El modelo de Suess consideraba que la contracción era la fuerza motriz que desencadenaba bruscas aceleraciones en las transformaciones drásticas, estando dichas aceleraciones separadas por largos intervalos de calma relativa, en una Tierra que se enfriaba y se contraía. Sugirió que las masas terrestres actuales de Australia, la India y África eran fragmentos de una masa

de tierra mucho más grande (a la que llamó continente de Gondwana, según el nombre de una región de la India) que había existido en otros tiempos en el hemisferio sur y que en gran parte se había hundido en el interior de la Tierra cuando éste se estaba enfriando. Según esta teoría, la corteza de la Tierra, al arrugarse, había formado plegamientos (cadenas montañosas y *rifts*[*]), y enormes porciones de la corteza (tanto en el Atlántico, como en zonas del hemisferio sur) se habían hundido en el espacio que había quedado libre en el interior cuando éste se enfrió y se contrajo, formando nuevas cuencas oceánicas entre masas de tierra que antes habían estado conectadas; pero todo esto sucedió de forma repentina y no como un proceso continuo y gradual. Este modelo no se sostuvo cuando se realizaron las investigaciones adecuadas. Por ejemplo, la cantidad de arrugamientos y plegamientos necesarios para formar tan sólo los Alpes, modelando (según la síntesis de Suess) 1200 kilómetros de corteza para producir 150 kilómetros de montañas, correspondería a un enfriamiento de 1200º. Serían aún mayores los enfriamientos necesarios para producir los encogimientos que supuestamente habrían hecho surgir la cordillera del Himalaya, las montañas Rocosas y los Andes, que se formaron básicamente al mismo tiempo que las montañas de los Alpes. Pero el golpe decisivo contra todos estos modelos fue el descubrimiento de la radioactividad, realizado casi en el mismo momento en que Suess desarrollaba su síntesis y que demostraba que el interior de la Tierra en absoluto se estaba enfriando de una manera drástica. Sin embargo, la historia de la síntesis de Suess es importante por dos razones. En primer lugar, pone de manifiesto que a principios del siglo XX no existía un «modelo estándar» para la historia de la Tierra; en segundo lugar, nos dio un nombre, Gondwana, que empezaría a resultar familiar cuando quedó establecida la teoría de la deriva continental. No obstante, aunque esta teoría también se había aireado durante el si-

glo XIX, no fue aceptada de forma general hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX, es decir, hace menos de cincuenta años.

PRIMERAS HIPÓTESIS SOBRE LA DERIVA CONTINENTAL

Entre las distintas variaciones sobre el tema de la deriva continental expuestas en el siglo XIX estaba la teoría según la cual los continentes podrían estar asentados sobre irnos cimientos cristalinos magnetizados y estarían desplazándose hacia el norte, empujados por un flujo magnético. También se sugería que la Tierra originalmente, no sólo era de un tamaño menor que el que tiene hoy en día, sino que además tenía forma tetraédrica y, por añadidura, los continentes habrían estado juntos, pero se habrían desgajado unos de otros por efecto de una expansión catastrófica que también lanzó a la Luna fuera de la cuenca mediterránea y la colocó en su órbita actual. En 1858, el año anterior a la publicación de *El origen de las especies*, Antonio Snider Pellegrini, un americano que trabajaba en París, publicó un libro, *La Création et ses mystères devoilés*, en el que planteaba un curioso modelo basado en su interpretación de la Biblia. El modelo incluía una serie de catástrofes que habrían tenido lugar en la Tierra mientras ésta se contraía rápidamente al principio de su historia. Vale la pena mencionarlo únicamente porque en este libro apareció publicado por primera vez un mapa en el que se unían los continentes de ambos lados del océano Atlántico y que se utilizó para explicar las similitudes entre los fósiles hallados en yacimientos de carbón situados en lados opuestos del océano. Este mapa se ha reeditado numerosas veces, dando la impresión equívoca de Snider Pellegrini había logrado realmente un modelo coherente de la deriva continental. Una versión algo más científica (pero también catastrofista) de los movimientos continentales fue la propuesta por

Osmond Fisher en un informe publicado en la revista científica *Nature* el 12 de enero de 1882. Asumió una teoría propuesta por el astrónomo George Darwin (1845-1912), uno de los hijos de Charles Darwin, según la cual la Luna se habría formado cuando la joven Tierra se escindió en dos trozos desiguales. Fisher sugirió que la cuenca del Pacífico marcaba la herida dejada por la Luna al desgajarse de la Tierra y que los materiales continentales del otro lado del mundo se habrían roto y sus fragmentos se habrían separado cuando el resto de la superficie terrestre se habría desplazado lentamente en dirección al hueco para comenzar a rellenarlo.

ALFRED WEGENER: EL PADRE DE LA TEORÍA DE LA DERIVA CONTINENTAL

Durante las primeras décadas del siglo XX aparecieron también otras versiones de la deriva continental. Pero la que (por fin) dio en la diana e influyó definitivamente en el desarrollo de las ciencias que estudian la Tierra fue la que propuso el meteorólogo alemán Alfred Wegener, inicialmente en 1912. Dado que procedía de una disciplina científica diferente (en primer lugar estudió astronomía), Wegener sabría probablemente poco sobre la plétora de antiguas teorías sobre la deriva continental (lo que seguramente era lo mejor, dado lo absurdas que eran algunas de ellas). Sus teorías llegaron a tener gran influencia, no sólo porque desarrolló un modelo más completo que los de sus predecesores, sino porque durante varias décadas hizo campaña para difundirlas, buscando más pruebas que apoyaran su idea, defendiendo su modelo frente a las críticas que surgían y publicando un libro que llegó a editarse cuatro veces antes de que él muriera en 1930. Wegener armó un gran escándalo con su teoría sobre la deriva continental, en vez de limitarse a publicarla y dejarla abandonada a su suerte para que se fuera a pi-

que o se mantuviera a flote por su cuenta. Aunque muchos detalles de sus teorías eran incorrectos, su concepto global ha resistido la prueba del paso del tiempo, y a Wegener se le reconoce actualmente, con toda justicia, como el padre de la teoría de la deriva continental, tal como hoy en día se formula.

Wegener nació en Berlín el 1 de noviembre de 1880 y estudió en las universidades de Heidelberg, Innsbruck y Berlín, consiguiendo su doctorado en astronomía en esta última en 1905. Después entró en el Observatorio Aeronáutico Prusiano, en Tegel, donde trabajó durante cierto tiempo junto con su hermano Kurt (trabajaron literalmente juntos cuando emprendieron un vuelo en globo que duró 52 horas y media, un tiempo récord, para probar unos instrumentos). Desde 1906 hasta 1908, Wegener trabajó como meteorólogo para una expedición danesa al interior de Groenlandia y, a la vuelta, se incorporó a la Universidad de Marburgo como profesor de meteorología y astronomía. Publicó un libro de texto de meteorología en 1911, pero para entonces ya estaba desarrollando sus teorías sobre la deriva continental, que se editaron por primera vez en 1912, en un par de informes basados en conferencias que había dado en Frankfurt del Main y en Marburgo en enero de aquel año. Como Wegener recordaría más tarde, en 1910 uno de sus colegas de Marburgo había recibido un nuevo atlas del mundo y, mientras lo miraba, a Wegener le llamó la atención (como a otros anteriormente) el hecho de que parecía que la costa este de Sudamérica y la costa oeste de África tendría que encajar la una con la otra, como las piezas de un *puzle*, sugiriendo la posibilidad de que en algún tiempo hubieran podido estar juntas. Aunque se quedó intrigado, la idea le pareció improbable y no la desarrolló hasta la primavera de 1911, cuando encontró un informe en el que se hablaba de las similitudes paleontológicas entre los estratos de Brasil y los de África. Esta prueba se presentaba en el informe para apoyar la idea de que pudiera haber

existido un puente de tierra que hubiera unido los dos continentes; pero Wegener vio las cosas de otra manera. En la primera edición de lo que se convertiría en su obra maestra, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, publicada en 1915, afirmaba lo siguiente:[1]

> Esto me indujo a emprender un examen rápido de las investigaciones relevantes llevadas a cabo en los campos de la geología y la paleontología. Este examen corroboró inmediatamente y con fuerza mis suposiciones, de tal modo que arraigó en mi mente la convicción de que la teoría [de la deriva continental] tenía básicamente validez.

Otra prueba más contribuyó a persuadir a Wegener de que estaba en camino de llegar a algo —el encaje de los continentes como piezas de un puzle es aún mejor si se compara no las líneas costeras actuales, que dependen de la altura que tiene el océano ahora, sino los bordes de la plataforma continental, que son los auténticos bordes de los continentes, donde existe un hundimiento abrupto hacia el fondo oceánico—. Sin embargo, aunque esta idea había arraigado, varios acontecimientos distrajeron a Wegener y retrasaron el desarrollo completo de su teoría. Poco después de la presentación de sus primeras teorías sobre la deriva en aquellas conferencias de enero de 1912, Wegener partió con otra expedición a Groenlandia, de la cual regresó en 1913, año en que contrajo matrimonio con Else Köppen.[2] Todos los planes que la pareja hizo para llevar una tranquila vida académica se trastocaron con el estallido de la primera guerra mundial, ya que Wegener fue llamado a filas como teniente en la reserva y prestó servicios en el frente occidental, donde fue herido dos veces durante los primeros meses de la contienda; fue declarado inútil para continuar prestando el servicio activo y, después de recuperarse, trabajó en el servicio meteorológico del ejército. Precisamente durante su baja por convalecencia escribió la primera versión de su famoso libro (cuyo título se puede traducir como *El origen de los continentes y*

de los océanos). Fue insignificante el impacto que produjo este libro en su época. Se publicó en 1915, en un momento álgido de la guerra, y era poco más que un folleto, ya que sólo tenía 94 páginas. Después de la guerra, Wegener trabajó para el Laboratorio de la Marina Alemana en Hamburgo (de nuevo junto a su hermano) y fue también profesor de meteorología en la recién fundada Universidad de Hamburgo. Consiguió fama como meteorólogo destacado, aunque también continuó trabajando en su modelo de deriva continental, sacando nuevas ediciones de su libro, cada una más voluminosa que la anterior, en 1920 y 1922. Sus amigos se inquietaron pensando que este libro podía perjudicar la reputación del meteorólogo, pero, independientemente de lo que los demás pensaran sobre la deriva continental, Wegener era tan bueno en su especialidad profesional que en 1924 fue nombrado catedrático de meteorología de la Universidad de Graz, en Austria. Aquel mismo año, publicó, junto con Wladimir Köppen, lo que fue el primer intento de dar una explicación de la evolución del clima en tiempos pasados, basándose en la deriva continental, y también se publicó tanto la traducción francesa como la inglesa de la tercera edición (1922) de *El origen de los continentes y de los océanos*. Pero, justo cuando Wegener parecía estar consiguiendo que creciera la audiencia para sus teorías, le fue arrebatada la oportunidad de seguir promocionándolas, aunque preparó una cuarta edición de su libro, en la que respondía a las críticas a la tercera edición surgidas en el mundo angloparlante que acababa de conocer sus teorías. Esta cuarta edición se publicó en 1929. En 1930, Wegener, que tenía ya 49 arios de edad, partió de nuevo a Groenlandia, para tomar parte en una nueva expedición, esta vez dirigiéndola; el objetivo de esta expedición era recoger pruebas que apoyaran la hipótesis de la deriva. La expedición se vio en apuros en el desolado casquete glaciar de Groenlandia y, dado que las provisiones empezaban a escasear en el campamento que habían es-

tablecido en el interior del territorio, el 1 de noviembre de 1930 (el día en que cumplía 50 años) Wegener partió en compañía de un esquimal hacia la base principal situada en la costa. Pero nunca llegó. Durante la primavera siguiente, su cuerpo fue hallado en el casquete glaciar, en la ruta que enlazaba los dos campamentos, cuidadosamente envuelto en su saco de dormir y con los esquíes plantados hacia arriba marcando el lugar; de su compañero nunca más se supo. A partir de entonces, la teoría de la deriva continental tendría que hundirse o salir a flote sin la ayuda de su principal defensor.

La prueba de la existencia de Pangea

El modelo de Wegener consideraba que la Tierra estaba formada por una serie de capas superpuestas, cuya densidad aumentaba desde la corteza hacia el núcleo. Constató que los continentes y los fondos oceánicos son básicamente diferentes, describiendo los continentes como bloques de roca granítica ligera (conocida como sial, una abreviatura de sílice-aluminio, aludiendo a su composición) flotando generalmente sobre rocas basálticas más densas (sima, contracción de sílicemagnesio), que, bajo una capa de sedimentos, son las rocas que forman el fondo oceánico. Dijo que los bloques continentales actuales siguen teniendo esencialmente los mismos rasgos generales que han tenido desde que se fraccionó un único supercontinente, Pangea, que contenía toda la superficie terrestre del planeta a finales de la era mesozoica (hace alrededor de 150 millones de años, según la datación moderna). Un importante punto débil del modelo de Wegener es que no aportaba razones que justificaran la fragmentación de Pangea y, con respecto a las causas de la deriva continental, sólo podía alegar ideas más bien vagas, como una «retirada del polo» ocasionada por fuerzas centrífugas, o posibles efectos de las mareas. Pero fue más allá que sus

predecesores al señalar que los emplazamientos de los *rift valleys* o valles del rift (como el Valle del Gran Rift, que se encuentra en África oriental) serían las ubicaciones de una fractura continental incipiente, indicando que cualquiera que fuese el proceso que impulsa la deriva continental, éste continúa todavía actualmente. De esta manera, Wegener hizo que su versión de la teoría de la deriva continental fuese una versión uniformitarianista (o actualista). Es crucial el hecho de que también basara sus teorías en el tamaño constante de la Tierra, en la que no se habrían producido contracciones o expansiones catastróficas (ni siquiera graduales). Una de las características más flojas del modelo era que Wegener suponía que los continentes se habían abierto camino a través del sima del fondo marino, una hipótesis que los geólogos encontraron difícil de aceptar (con razón). Pero Wegener relacionó sus teorías con el modo en que las montañas se habían formado a lo largo de los bordes orientales de los continentes americanos del norte y del sur, cuando estos continentes se habían separado y alejado de Europa y África, indicando que los continentes se habían arrugado al abrirse paso a través del sima. Algunas cadenas montañosas, como la del Himalaya, situadas en el centro de grandes masas terrestres, podrían explicarse como el resultado de la colisión entre continentes.

Los detalles de la hipótesis de Wegener tenía aspectos acertados y otros erróneos. En lo que esta hipótesis resultaba especialmente buena era en las pruebas que recogía de la paleoclimatología, con las que demostraba que en un pasado lejano la glaciación se había producido simultáneamente en continentes que actualmente se encuentran lejos los unos de los otros y a gran distancia de las regiones polares; aparte del hecho de que Wegener solía ignorar a menudo las pruebas que no apoyaban sus tesis, con lo que hacía que los geólogos desconfiaran de la teoría en su totalidad, dicha teoría resultaba especialmente ma-

la en la creencia de que la deriva continental sucedía con tanta rapidez que Groenlandia se había separado de Escandinavia hace tan sólo entre 50 000 y 100 000 años, y se desplazaba hacia el oeste a una velocidad de 11 metros por año. Este planteamiento provenía de las investigaciones geodésicas realizadas en 1823 y 1907, y las mediciones eran sencillamente inexactas; actualmente, utilizando la medición de distancias por láser desde los satélites, sabemos que el Atlántico realmente se está expandiendo a una velocidad de un par de centímetros por año (fue supuestamente por mejorar los datos geodésicos por lo que Wegener hizo su último y fatal viaje al casquete glaciar de Groenlandia). Pero la contribución más valiosa que hizo Wegener al desarrollo de la teoría de la deriva continental fue su síntesis, el hecho de reunir pruebas para apoyar la existencia en el pasado del supercontinente de Pangea relacionando las cordilleras, las rocas sedimentarias, las cicatrices dejadas por las antiguas glaciaciones y la distribución, no sólo de los fósiles, sino también de las plantas y los animales vivos. En una analogía muy expresiva, Wegener hizo una comparación con una hoja de papel impreso desgarrada en trozos. Si los trozos pudieran encajarse de tal modo que las palabras impresas se juntaran para formar frases con sentido, habría una prueba irrefutable de que el encaje de los trozos era correcto; de la misma manera, el tipo de pruebas que Wegener reunió formó un «texto» geológico coherente cuando se juntaban los fragmentos de Pangea. Fue esta amplia gama de pruebas la que justificó la deriva continental, incluso antes de que se llegara a comprender plenamente los mecanismos.

La técnica radioactiva para medir la edad de las rocas

En 1907, después de superar los exámenes para obtener una beca del Estado que le proporcionó treinta chelines semanales

(una libra y media) durante el curso académico. Esto no era suficiente para vivir, ni siquiera en 1907, y no había posibilidad alguna de que sus padres le ayudaran económicamente; Holmes tuvo que arreglárselas lo mejor que pudo.

Por aquella época, tanto la radioactividad como la edad de la Tierra eran temas científicos de gran actualidad y el americano Bertram Boltwood (1870-1927) había desarrollado recientemente una técnica para fechar las muestras de rocas a partir de las proporciones de plomo y de isótopos de uranio que contenían. Dado que la desintegración radioactiva del uranio produce finalmente plomo, con una escala de tiempos característica (como veremos en el capítulo 13), la medición de estas proporciones puede revelar la edad de las rocas. Como proyecto para la licenciatura en el último curso, Holmes utilizó esta técnica para datar muestras de rocas devonianas procedentes de Noruega, obteniendo como resultado una edad de 370 millones de años. Cuando apenas habían transcurrido diez años desde el comienzo del siglo XX, incluso un estudiante que todavía no tenía una licenciatura podía fechar un fragmento de roca, que desde luego no era en absoluto la roca más antigua de la corteza terrestre, viendo que la edad de dicha roca estaba muy lejos, por exceso, de la escala temporal asignada al sistema solar según la teoría de que el Sol liberaba calor sólo como consecuencia de su colapso gravitatorio. Tras obtener la licenciatura en 1910 con una reputación brillante, pero con un montón de deudas acumuladas durante sus años de estudiante, Holmes estuvo encantado de conseguir un puesto de trabajo bien pagado para seis meses, como geólogo encargado de realizar prospecciones en Mozambique, con una retribución de 35 libras esterlinas mensuales. Un grave brote de fiebres palúdicas retrasó su regreso a casa y él mismo contrajo la malaria (lo que de rebote fue una suerte, ya que le impidió incorporarse al ejército durante la primera guerra mundial). Cuando su situación finan-

ciera estuvo por fin en orden (con el trabajo en Mozambique consiguió ganar 89 libras, 7 chelines y 3 peniques), Holmes pudo entrar a formar parte de la plantilla del Imperial College (que era la institución en que se había convertido el Royal College of Science en 1910), donde permaneció hasta 1920, obteniendo el doctorado en 1917. Posteriormente trabajó en Birmania para una empresa petrolífera y luego regresó a Gran Bretaña en 1924, para convertirse en catedrático de geología de la Universidad de Durham. Se trasladó a la Universidad de Edimburgo en 1943 y se jubiló en 1956. Para entonces ya había desarrollado completamente la técnica de la radioactividad para determinar la edad de las rocas y había calculado la edad de la Tierra en 4500 ± 100 millones de años.[3] Mientras tanto, escribió un libro de texto que ha tenido una gran influencia entre los geólogos, *Principles of Physical Geology* (con un título elegido deliberadamente como reconocimiento a Lyell), que se publicó por primera vez en 1944 y que en sucesivas ediciones revisadas ha sido desde entonces un texto de referencia. Parte de su éxito se explica por el modo en que Holmes abordó la tarea de hacer que la geología fuese inteligible. Como escribió más tarde a un amigo, «para conseguir un gran número de lectores en los países angloparlantes, basta con pensar en el alumno más estúpido que se haya tenido jamás y en cómo le explicaríamos el tema a dicho alumno».[4]

La explicación de Holmes sobre la deriva continental

El interés de Holmes por la deriva continental fue suscitado, casi con toda seguridad, antes de 1920 por uno de sus colegas del Imperial College, John Evans, que leía en alemán con fluidez y se convirtió pronto en un entusiasta de las teorías de Wegener (posteriormente escribió el prólogo de la primera edición inglesa del libro de Wegener). En Inglaterra se acababa de pu-

blicar la tercera edición cuando Holmes regresó de Birmania, y parece ser que esto fue lo que le impulsó a iniciar su investigación sobre la deriva continental, durante un descanso en el trabajo sobre el uranio y el plomo, al poco tiempo de haberse instalado en Durham. Aunque comenzó optando por la hipótesis de la contracción, sus conocimientos sobre la radioactividad y el potencial que ésta proporcionaba para generar calor en el interior de la Tierra pronto le hicieron cambiar sus puntos de vista. La idea de que la convección podría estar asociada con la formación de las montañas y con la deriva continental, surgió en su mente a raíz de la discusión sobre estos temas planteada en la alocución presidencial de A. J. Bull ante la Geological Society de Londres en 1927 (sólo cien años después de que Charles Darwin ingresara en la Universidad de Cambridge para intentar convertirse en pastor protestante). En diciembre de aquel año, Holmes presentó un informe en la Geological Society de Edimburgo en el que examinaba estas teorías. Sugería que, aunque los continentes de hecho flotaban en un material más denso, más o menos como Wegener planteaba, sin embargo no se desplazaban a través del sima. En cambio, este material más denso sí que se movía muy lentamente, impulsado por corrientes de convección producidas por el calor que se generaba en el interior de la Tierra, fracturándose en algunos lugares (como en el caso de la cordillera o dorsal oceánica que recorre el centro del océano Atlántico)[*] y además empujando y alejando los continentes a cada lado de la fractura, mientras dichos continentes chocaban en otras zonas del globo. Aparte del calentamiento radioactivo, el componente decisivo del modelo de Holmes era el tiempo —las rocas «sólidas», calentadas desde abajo, podían de hecho estirarse y fluir, como una melaza muy espesa (o como la «masilla mágica» que se puede encontrar en algunas jugueterías), pero sólo de una forma *muy* lenta—. No es sorprendente que uno de los primeros geólogos que aceptaron

la deriva continental fuera también uno de los primeros que calcularon cuantitativamente la enorme edad de la Tierra y se implicaron activamente en la tarea de obtener una medición de dicha edad. En 1930, Holmes realizó su informe más detallado de la deriva continental, en el que describía cómo las corrientes de convección que actuaban en el interior de la Tierra como resultado del calor generado por la desintegración radioactiva podían haber causado la fragmentación de Pangea, primero en dos grandes masas terrestres (Gondwana en el hemisferio sur y Laurasia en el hemisferio norte), que a su vez se fracturaron y se desplazaron a la deriva para configurar las formas terrestres que vemos hoy en día en la superficie de la Tierra. Todo esto se publicó en *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, incluyendo un cálculo muy próximo a las mediciones actuales y según el cual las comentes de convección moverían los continentes a una velocidad de unos 5 centímetros por año —lo suficiente para configurar la cuenca atlántica a partir de una fractura que se produjo en la corteza terrestre durante un intervalo de tiempo de unos 100 millones de años.

En 1930 se habían perfilado ya muchos aspectos de la versión moderna de la deriva continental, pero Holmes presentó las pruebas de la existencia de dicha deriva en el capítulo final de sus *Principles of Physical Geology* en 1944, argumentando claramente a favor de esta teoría, pero también señalando honestamente los puntos débiles de la versión del propio Wegener:

> Wegener puso en orden una impresionante colección de hechos y opiniones. No se podía negar que algunas de sus pruebas eran convincentes, pero su defensa estaba basada en la especulación y en alegatos especiales, en tal medida que provocó una tormenta de críticas adversas. Lo que es más, los geólogos en su mayoría eran reacios a admitir la posibilidad de la deriva continental, porque ningún proceso natural reconocido parecía tener la más remota posibilidad de causar este fenómeno… Sin embargo, el aspecto realmente importante no es tanto desmentir los puntos de vista particulares de Wegener, sino decidir, a partir de pruebas relevantes, si la deriva continental es o no un tipo genuino de movimiento terrestre.

Las explicaciones pueden esperar hasta que sepamos con seguridad qué es lo que necesita una explicación.

Y justo al final de su capítulo sobre la deriva continental, después de defender la convección como la fuerza motriz de todo el proceso, Holmes escribió lo siguiente:

> Sin embargo, se debe reconocer con claridad que las teorías de esta índole que son meramente especulativas y están inventadas especialmente para satisfacer los requisitos, no pueden tener valor científico hasta que consigan el refrendo mediante pruebas independientes.

Me pregunto si Holmes sabía lo cerca que estaba de ser un eco de las palabras que puso Arthur Conan Doyle en boca de su homónimo de ficción en *A Scandal in Bohemia* (*Escándalo en Bohemia*):

> Es un error capital teorizar antes de tener los datos. Sin darse cuenta, uno empieza a retorcer los hechos para adecuarlos a las teorías, en vez de hacer que las teorías se adecúen a los hechos.

Entre 1930 y 1944 no sucedió prácticamente nada que reforzara la defensa de la deriva continental, precisamente porque no había nuevos hechos que permitieran continuar. Desde luego, entre la vieja guardia había una cierta resistencia frente a las teorías nuevas, sólo porque eran nuevas —siempre hay personas reacias a desechar todo lo que les han enseñado con el fin de asumir nuevos conocimientos sobre el mundo, independientemente de lo irrefutables que sean las pruebas—. Pero, en el contexto de las décadas de 1930 y 1940, las pruebas que apoyaban la teoría de la deriva continental eran más bien convincentes (quizás incluso muy convincentes, si se aceptaba la obra de Holmes), pero no irrefutables. Existían otras teorías muy bien consideradas y que rivalizaban con ésta, sobre todo el permanentismo, y además, dado que Wegener había muerto y Holmes se concentraba en sus técnicas de datación, no había nadie que asumiera la defensa de la deriva continental, que fue perdiendo gradualmente el favor de que había gozado (hasta el

punto de que prácticamente la única crítica que recibió el gran libro de Holmes procedía de personas que consideraban indebida la inclusión de un capítulo en el que se defendían unas teorías tan excéntricas). Lo que hizo que la teoría de la deriva continental fuera en un primer momento respetable, y luego un paradigma aceptado como el modelo estándar de la manera en que la Tierra se comporta, fueron desde luego las nuevas pruebas evidenciales —nuevas pruebas que aparecieron en las décadas de 1950 y 1960 gracias a la nueva tecnología, que se desarrolló en parte como resultado del gran impulso que la segunda guerra mundial dio a todas las ciencias tecnológicas—. Se trata asimismo del primer ejemplo que encontraremos en este libro sobre cómo la ciencia se convirtió en una disciplina donde el progreso real sólo podía conseguirse con el trabajo en grandes proyectos de un gran número de personas que eran prácticamente intercambiables. Incluso alguien como Newton hubiera sido incapaz de obtener toda la información necesaria para realizar el avance decisivo que convirtió la hipótesis de la deriva continental en la teoría de la tectónica de placas, aunque sin duda él hubiera sido capaz de ensamblar todas las pruebas para formar un modelo coherente.

A pesar de que los adelantos tecnológicos procedentes de la segunda guerra mundial contribuyeron finalmente a proporcionar las pruebas decisivas que apoyaban la teoría de la deriva continental, durante la década de 1940 muchos geólogos se encontraban trabajando en proyectos relacionados con cuestiones bélicas, o prestando servicios en las fuerzas armadas, o viviendo en países ocupados donde había pocas oportunidades para hacer investigaciones científicas globales. En el período inmediatamente posterior a la guerra, la reconstrucción de Europa y los cambios drásticos en la relación entre la ciencia y el gobierno en Estados Unidos contribuyeron a retrasar el desarrollo y la aplicación de las nuevas técnicas. Entretanto, aunque se

publicaban informes sobre la deriva continental (tanto a favor, como en contra), este tema quedó estancado y relegado a un segundo plano dentro de las ciencias geológicas. Sin embargo, la teoría estaba lista y esperando entre bastidores cuando comenzaron a aparecer las nuevas pruebas, que en otra situación habrían resultado extremadamente desconcertantes y difíciles de explicar.

LAS INVERSIONES GEOMAGNÉTICAS Y EL NÚCLEO FUNDIDO DE LA TIERRA

La primera prueba nueva surgió a partir del estudio del magnetismo fósil —el magnetismo encontrado en muestras de rocas que forman parte de estratos antiguos. El impulso para emprender este trabajo llegó inicialmente de la investigación realizada sobre el campo magnético terrestre, cuyo origen era todavía un enigma en la década de 1940. Walter Elsasser (1904-1991), uno de los muchos científicos nacidos en Alemania que abandonaron este país cuando Adolf Hitler llegó al poder y acabaron instalándose en Estados Unidos, comenzó a finales de la década de 1930 a desarrollar la teoría de que el magnetismo terrestre se genera en una dinamo interior natural y, poco después de terminar la guerra, en 1946, publicó detalladamente sus teorías. La idea fue desarrollada posteriormente por el geofísico británico Edward Bullard (1907-1980), que durante la guerra había estado trabajando sobre técnicas para desmagnetizar barcos (*degaussing* o desimantación) con el fin de protegerlos contra las minas magnéticas. A finales de la década de 1940, Bullard estaba trabajando en la Universidad de Toronto, donde continuó desarrollando el modelo del campo magnético terrestre como producto de la circulación de fluidos conductores dentro del caliente núcleo fluido del planeta (dicho de una forma más sencilla, convección y rotación en hierro fundido).

Durante la primera mitad de la década de 1950, como director del National Physical Laboratory del Reino Unido en Londres, utilizó el primer ordenador electrónico de que disponían en esta institución, para realizar las primeras simulaciones numéricas de este proceso similar a una dinamo.

Por aquella época, las mediciones del magnetismo fósil habían demostrado que el campo magnético de la Tierra había tenido la misma orientación relativa a las rocas durante los últimos 100 000 años. Las rocas se magnetizan cuando se depositan como un material fundido que fluye desde los volcanes o desde las fracturas que se forman en la corteza terrestre y, una vez que se asientan, conservan la pauta del campo magnético en el que se han formado, convirtiéndose en algo similar a las barras imantadas. Pero, especialmente los investigadores británicos (sobre todo pequeños grupos que trabajaban en las universidades de Londres, Cambridge y Newcastle-upon-Tyne) habían descubierto que en rocas más antiguas la dirección del magnetismo fósil podía ser bastante diferente de la orientación actual del campo geomagnético, como si el campo o las rocas hubieran cambiado de posición después de que se solidificaran los estratos. Lo que aún resultaba más extraño era que, según descubrieron, parecía haber momentos en el pasado geológico en que el campo electromagnético había tenido el sentido opuesto al que tiene hoy en día, con un intercambio de los polos magnéticos norte y sur. Fueron estas evidencias electromagnéticas las que calentaron el debate sobre deriva continental a principios de la década de 1960; algunos investigadores utilizaron las orientaciones magnéticas de las rocas en momentos concretos del pasado geológico como las «marcas impresas» que habían de ser comparadas a ambos lados de las junturas de las reconstrucciones continentales, y descubrieron que dichas reconstrucciones coincidían ampliamente con las que había planteado Wegener.

Mientras se hacía todo esto, se había producido un enorme desarrollo de los conocimientos relativos a los fondos marinos, que constituyen dos tercios de la superficie de la corteza terrestre. Antes de la primera guerra mundial estos fondos eran todavía en gran medida un mundo misterioso e inexplorado. La necesidad de encontrar modos de contrarrestar la amenaza de los submarinos favoreció el desarrollo de una tecnología que serviría para identificar lo que había bajo la superficie del océano (especialmente la localización por resonancia o sonar) y también se incentivó la utilización de esta tecnología, no sólo para detectar submarinos directamente, sino, después de la guerra, también para trazar los mapas de los fondos marinos, en parte por curiosidad científica, pero también (en la medida en que esto interesaba a los gobiernos que manejaban mucho dinero) para localizar los lugares donde podían esconderse los submarinos. Era precisamente esta tecnología la que, a finales de la década de 1930, había empezado a completar las características de contorno de los fondos marinos, siendo el descubrimiento más notable la presencia de un sistema de elevaciones, una cordillera en medio del océano, no sólo la que recorría el océano Atlántico, sino una especie de espina dorsal que se extendía por el centro del mar Rojo. Durante la segunda guerra mundial se produjo una enorme mejora en la tecnología utilizada para este tipo de trabajos y la Guerra Fría estimuló el mantenimiento de un alto nivel de financiación continuada, ya que los submarinos provistos de armas nucleares se convirtieron en los sistemas de armamento primarios. En Estados Unidos, por ejemplo, la Scripps Institution of Oceanography tenía en 1941 un presupuesto de poco menos de 100 000 dólares, una plantilla de 26 personas y poseía un pequeño barco. En 1948, contaba con un presupuesto de poco menos de un millón de dólares, una plantilla de 250 personas y cuatro barcos.[5] Lo que los científicos que trabajaban en la Scripps Institution of Oceanography y

otros investigadores oceánicos descubrieron fue algo bastante inesperado. Antes de la década de 1940, los geólogos habían supuesto que el fondo marino constituía la parte más antigua de la corteza terrestre —incluso los partidarios de la deriva continental pensaban de esta manera—. Porque se suponía que eran antiguos, se creía también que los fondos marinos estaban cubiertos de enormes cantidades de sedimentos antiguos erosionados en tierra firme durante inmensos períodos de tiempo, formando un estrato esencialmente desprovisto de rasgos distintivos y que podía tener un espesor de 5 o 10 kilómetros. Además, se suponía que la propia corteza situada debajo del sedimento tenía un espesor de varias decenas de kilómetros, como la corteza de los continentes. Cuando se obtuvieron muestras de los fondos oceánicos y se llevaron a cabo los exámenes correspondientes, se demostró que todas estas ideas estaban equivocadas. Sólo hay una fina capa de sedimentos y difícilmente se puede decir que sea absolutamente diferente de los bordes de los continentes. Todas las rocas de los fondos marinos son jóvenes, encontrándose las más recientes próximas a las dorsales oceánicas, que son características geológicamente activas donde la actividad volcánica submarina marca la línea de una fractura en la corteza terrestre (por lo tanto algunas de estas rocas han nacido literalmente ayer mismo, en el sentido de que es entonces cuando se solidificaron a partir del magma fundido). Las investigaciones sísmicas demuestran que el espesor de la corteza terrestre en el fondo de los océanos es de 5 a 7 kilómetros, lo que resulta muy poco en comparación con una media de 34 kilómetros, que es el espesor de la corteza continental (en algunos lugares, el espesor de la corteza continental alcanza entre 80 y 90 kilómetros).

El modelo de la «expansión de los fondos marinos»

Las piezas del rompecabezas quedaron ensambladas de una manera lógica en 1960 gracias a los trabajos del geólogo americano Harry Hess (1906-1969), de la Universidad de Princeton. Según este modelo, que lleva el nombre de «expansión de los fondos marinos»;[6] las dorsales o cordilleras oceánicas se originan en la materia fluida del manto terrestre (la capa de material rocoso parecido a la melaza que se encuentra directamente debajo de la corteza sólida) por efecto de las corrientes de convección que ascienden fluyendo desde zonas profundas situadas bajo la superficie. Esta materia caliente no es líquida en el sentido en que lo es el agua de los océanos, pero está lo bastante caliente como para fluir lentamente como resultado de la convección, algo parecido, en cierto modo, al vidrio caliente.[7] La actividad volcánica asociada con las cordilleras o dorsales oceánicas marca el lugar donde esta materia caliente aflora rompiendo la superficie. Posteriormente se extiende a ambos lados de la dorsal, empujando y alejando a los continentes que se encuentran a cada lado de la cuenca oceánica, solidificándose las rocas más jóvenes junto a las dorsales actuales, mientras las que son más antiguas, depositadas decenas o cientos de millones de años antes, se quedan más apartadas de las dorsales, en los lugares hacia los que han sido empujadas para hacer sitio a los materiales nuevos. Así pues, no es necesario que los continentes se abran camino a través de la corteza oceánica —que precisamente es lo más razonable, ya que las investigaciones de los fondos marinos no han proporcionado pruebas de ello—. La nueva corteza oceánica que se crea de esta manera es la causa de que el océano Atlántico sea cada vez más ancho, siendo la velocidad del ensanchamiento de irnos 2 centímetros por año, aproximadamente la mitad de la velocidad que sugería Holmes. En el modelo de Hess hay ciertos ecos de las teorías de Holmes, pero la diferencia crucial entre ambos es que allí donde Holmes sólo podía hablar en términos generales basados en las leyes

fundamentales de la física, Hess poseía pruebas directas de lo que estaba sucediendo y podía poner en sus cálculos cifras obtenidas en las mediciones de la corteza oceánica. En su modelo Holmes ignoraba ampliamente las cuencas oceánicas, por la sencilla razón de que en su época se sabía muy poco sobre dichas cuencas; una vez que se hubo asimilado el trabajo de Hess, para lo cual tuvo que pasar la mayor parte de la década de 1960, las cuencas oceánicas llegaron a ser consideradas como los lugares donde transcurría la acción en el proceso de la deriva continental, mientras que los propios continentes se limitaban literalmente a dejarse llevar como resultado de la actividad asociada con la corteza de los fondos oceánicos.

Aunque el océano Atlántico se hace cada vez más ancho, esto no significa que la Tierra se esté expandiendo a la velocidad requerida para explicar la formación de toda la cuenca atlántica durante un par de cientos de millones de años, aproximadamente el 5 por 100 de la edad de la Tierra, es decir, a la velocidad que exigirían estas mediciones. En algunos lugares las corrientes de convección van hacia arriba, pero en otros se desplazan hacia abajo. El segundo componente fundamental del modelo de Hess de la expansión de los fondos oceánicos fue la hipótesis de que en algunas partes del mundo (sobre todo a lo largo del borde occidental del océano Pacífico), la delgada corteza oceánica se está hundiendo bajo los bordes de una corteza continental más gruesa, sumergiéndose de nuevo en el manto que se encuentra debajo de ella. Esto explica tanto la presencia de zanjas oceánicas muy profundas en estas zonas del mundo, como los terremotos y la formación de volcanes en lugares como Japón —hay islas como las del Japón cuya existencia se debe totalmente a la actividad tectónica[8] asociada con este aspecto de la expansión de los fondos oceánicos—. El océano Atlántico se está ensanchando, mientras el océano Pacífico se estrecha. Al final, si este proceso continúa, América y Asia chocarán, for-

mando un nuevo supercontinente; entretanto, el mar Rojo, en su totalidad, con su propia dorsal en expansión, señala el lugar de una nueva región con actividad de materia que fluye en sentido ascendente, rompiendo la corteza terrestre y creando una hendidura que comienza a empujar a África alejándola de Arabia, que se iría hacia el este.

Cuando se desarrolló este modelo, resultó que servía también para explicar otros fenómenos, como la falla de San Andrés, en California, donde el ensanchamiento del Atlántico ha empujado a América hacia el oeste, hasta invadir una zona de expansión menos activa que existió anteriormente en lo que era, hace cientos de millones de años, una cuenca del Pacífico aún más ancha. Fallas como la de San Andrés proporcionan también pruebas que apoyan las nuevas teorías, como algunos geólogos se apresuraron a indicar. En dichos lugares, los bloques de la corteza terrestre se desplazan los unos con respecto a los otros a una velocidad de unos pocos centímetros por año, aproximadamente a las mismas velocidades que exige la nueva versión de la teoría de la deriva continental, y demuestran que la Tierra «sólida» no está en absoluto fija en una pauta geográfica permanente. La analogía tradicional, que nunca se ha podido mejorar hasta ahora, dice que la expansión de los fondos marinos es como una lenta cinta transportadora, que se enrolla sin final dando vueltas y vueltas. En toda la superficie del globo existe una compensación en las expansiones y contracciones, de tal forma que el planeta conserva siempre el mismo tamaño. [9]

El modelo de Hess, y las pruebas en las que se basaba, inspiraron a una nueva generación de geofísicos la idea de asumir el desafío de construir una teoría completa que explicase cómo funciona la Tierra, comenzando a partir de dicho modelo. Uno de los jugadores más destacados en lo que se parecía mucho a un juego en equipo fue Dan McKenzie (nacido en 1942), de la

Universidad de Cambridge. McKenzie recuerda[10] que fue una conferencia pronunciada por Hess en Cambridge en 1962, cuando Dan era todavía un estudiante, lo que disparó su imaginación y le llevó a reflexionar sobre los problemas que el modelo todavía no había conseguido resolver. En consecuencia McKenzie comenzó a buscar otras pruebas que lo justificaran. Otros geofísicos algo más veteranos que trabajaban también en Cambridge se sintieron asimismo inspirados tras la conferencia y dos de ellos, el doctorando Frederick Vine (1939-1988) y el director de su tesis Drummond Matthews (nacido en 1931), trabajaron juntos al año siguiente en una investigación crucial que relacionaba la prueba de las inversiones electromagnéticas con el modelo de deriva continental basado en la expansión de los fondos marinos.

A principios de la década de 1960, al tiempo que aumentaba el volumen de datos relativos a la historia magnética de la Tierra obtenidos en los continentes, se había empezado a recopilar la pauta del magnetismo en distintas zonas de los fondos marinos, utilizando para ello unos magnetómetros que remolcaban los buques geofísicos. Uno de los primeros estudios detallados de este tipo se realizó al nordeste del Pacífico, cerca de las costas de la isla de Vancouver, en torno a un fenómeno geológico conocido como el *ridge*[*] de Juan de Fuca. Estos estudios pusieron de manifiesto una pauta rayada de magnetismo en las rocas del fondo marino, con unas franjas que se dibujaban más o menos en dirección norte-sur; en una franja las rocas se encontraban magnetizadas de acuerdo con el campo geomagnético actual, pero en las franjas adyacentes las rocas tenían el magnetismo contrario. Cuando se trazaron en un mapa, sombreando en negro una de las orientaciones y dejando la otra de color blanco, la pauta resultante parecía un código de barras ligeramente distorsionado. Vine y Matthews sugirieron que estas pautas se producían como resultado de la expansión de los fondos mari-

nos. Las rocas fundidas que fluían desde una dorsal o una cresta oceánica, al depositarse, se magnetizaban con el magnetismo correspondiente en aquel momento al campo magnético terrestre. Sin embargo, las pruebas continentales mostraban que el campo magnético de la Tierra invertía su dirección de vez en cuando en el tiempo geológico.[11] Si Vine y Matthews estaban en lo cierto, esto significaba dos cosas. La primera, que la pauta de las franjas magnéticas en el fondo oceánico debería guardar correlación con la pauta de las inversiones geomagnéticas que revelaban las rocas continentales, proporcionando un modo de comparar entre sí las dos pautas y ajustar la datación magnética de las rocas. La segunda cosa sería la siguiente: dado que, según la teoría de Hess, la corteza se expande equitativamente a los dos lados de una dorsal oceánica, la pauta de magnetismo observada a un lado de la dorsal debería ser como la imagen en un espejo de la pauta que se ve al otro lado de la dorsal. Si fuera así, tendríamos una confirmación irrefutable de que el modelo de expansión de los fondos marinos constituía una buena explicación del funcionamiento de la Tierra.

Más teorías sobre la deriva continental

Con los datos limitados de que se disponía en 1963, los argumentos que presentaron Vine y Matthews sólo podían ser sugerencias, y no pruebas concluyentes que apoyaran las teorías de la expansión de los fondos marinos y de la deriva continental. Pero Vine, en colaboración con Hess y con el geofísico canadiense Tuzo Wilson (1908-1993), continuó desarrollando las teorías, teniendo en cuenta los nuevos datos sobre magnetismo que estaban llegando de todo el mundo, y pronto consiguió que su argumentación fuera irrefutable. Una de las aportaciones decisivas hechas por Wilson fue la constatación de que una dorsal en expansión como la que recorría el océano Atlántico

no tenía que ser necesariamente una característica continua, sino que podía estar formada por secciones estrechas que se hubieran desplazado lateralmente unas con respecto a otras (a lo largo de las denominadas fallas de transformación), como si no existiera una sola cinta transportadora muy amplia, sino una serie de estrechas cintas transportadoras situadas unas al lado de otras; Wilson también desempeñó un papel importante encajando en una todo global coherente muchas de las ideas de la nueva versión de la deriva continental. Fue un destacado defensor de estas ideas y acuñó el término *placa* para denominar cada una de las porciones rígidas de la corteza terrestre (porciones oceánicas, continentales, o una combinación de ambos tipos) que se desplazan por la acción de fuerzas asociadas con la expansión de los fondos marinos y con la deriva continental.

Las pruebas decisivas a favor del modelo de expansión de los fondos marinos llegó en 1965, cuando un equipo que viajaba a bordo del buque de investigaciones Eltanin llevó a cabo tres reconocimientos magnéticos transversales a través de la dorsal del Pacífico oriental, conocida como *East Pacific Rise*. Estos reconocimientos pusieron de manifiesto una llamativa similitud entre las franjas magnéticas asociadas con la dorsal del Pacífico oriental y las asociadas con el *ridge* (cresta) de Juan de Fuca, más al norte —pero también, desde la pauta de un lado de la dorsal hasta la imagen de esa pauta, como en un espejo, en el otro lado de la dorsal, muestran una simetría lateral tan pronunciada que cuando los gráficos se superpusieron, doblando la hoja a lo largo de la línea que indicaba la dorsal, ambos coincidían uno encima del otro—. Los resultados se anunciaron en abril de 1966 durante una reunión de la American Geophysical Union, que se celebró en Washington DC; a continuación fueron publicados en la revista *Science*, en un informe que constituyó un hito decisivo.[12]

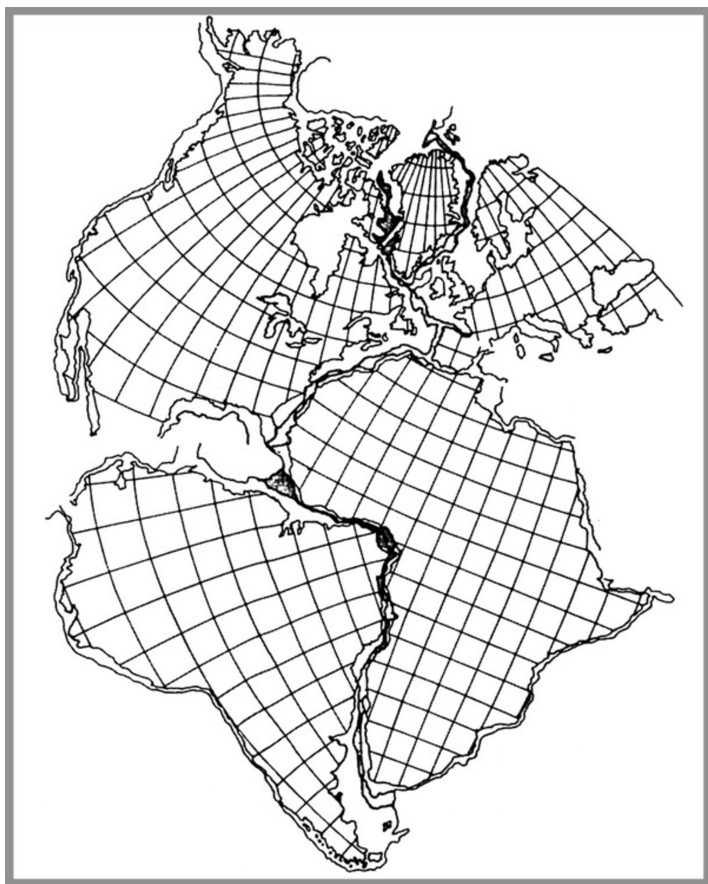
Entretanto, el planteamiento tradicional para reunir pruebas a favor de la deriva continental había recibido un impulso. A principios de la década de 1960, Bullard (que entonces era director del Departamento de Geodesia y Geofísica en Cambridge) defendió el argumento de que las pruebas geológicas que apoyaban la teoría de la deriva continental habían superado ya las dificultades con que el modelo se había tropezado en las décadas de 1920 y 1930, y presentó su alegato a favor de dicha teoría en una reunión de la Geological Society de Londres en 1963. Durante el año siguiente contribuyó a organizar un congreso de dos días sobre deriva continental en la Royal Society, donde se discutió sobre todos los trabajos más recientes, pero, paradójicamente, el mayor éxito lo tuvo la nueva versión de una idea muy vieja —una reconstrucción de la Pangea realizada a modo de ensamblaje de un rompecabezas—. Esta reconstrucción utilizaba lo que se presentó como un método objetivo, basado en una regla matemática para trasladar objetos de un lugar a otro sobre la superficie de una esfera (el teorema de Euler), y además se llevó a cabo una reconstrucción real para conseguir el «mejor encaje», definido matemáticamente y realizado mediante un ordenador electrónico, con el fin de obtener correspondencias imparciales y objetivas. El resultado fue sorprendentemente similar al encaje de los continentes realizado por Wegener y, a decir verdad, aportaba pocas novedades. Sin embargo, en 1964 la gente todavía se dejaba impresionar por los ordenadores y además, sucedía algo más significativo y que no había sucedido cuarenta años antes: estaban dispuestos a tomarse la deriva continental en serio, dado el peso de otras pruebas que los científicos habían ido reuniendo. Cualesquiera que fuesen las razones psicológicas, el «encaje de Bullard» de los continentes, publicado en 1965,[13] ha pasado a la historia

como un momento decisivo en el desarrollo de la teoría de la deriva continental.

Tectónica de placas

A finales de 1966, las pruebas que corroboraban la teoría de la deriva continental y la expansión de los fondos marinos eran irrefutables, pero todavía no habían sido reunidas en un conjunto coherente y completo. La mayoría de los jóvenes geofísicos entusiastas y con afanes innovadores abordaron el problema, compitiendo unos con otros para ser los primeros en publicar algo. Esta carrera la ganaron Dan McKenzie (que acababa de doctorarse en 1966) y su colega Robert Parker, que publicaron un informe en *Nature* en 1967,[14] introduciendo por primera vez la expresión *tectónica de placas* para referirse al conjunto global de estas teorías y utilizándolo para describir detalladamente la actividad geofísica de la zona del Pacífico —la placa del Pacífico, como se conoce actualmente— en cuanto al modo en que las placas se desplazan sobre la superficie de una esfera (de nuevo el teorema de Euler). Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, tuvo una idea similar, que publicó unos pocos meses más tarde y, aunque quedaban por completar muchos detalles (y siguen estudiándose aún en la actualidad), a finales de aquel año se había finalizado lo que a veces se denomina «la en las ciencias de la Tierra».[15] La esencia de la tectónica de placas es que las regiones del globo que están sísmicamente inactivas lo están porque forman placas rígidas (seis grandes placas y alrededor de una docena de otras más pequeñas, que cubren la totalidad de la superficie del planeta). Una placa puede estar formada sólo por corteza oceánica o sólo por corteza continental, o por ambas; sin embargo, la mayor parte de la actividad geológica significativa que se produce en la superficie de la Tierra tiene lugar en las fronteras entre placas —los már-

genes o bordes de las placas—. Los márgenes constructivos son lugares donde, como ya hemos visto, se está creando una nueva corteza oceánica en las dorsales oceánicas y esta nueva corteza se extiende por ambos lados. Los márgenes destructivos son regiones en las que una placa se desliza bajo el borde de otra, introduciéndose en el manto con un ángulo de unos 45 grados y fundiéndose de nuevo en el magma que está debajo. Finalmente, los márgenes conservadores son regiones donde la corteza ni se crea ni se destruye, pero las placas se rozan lateralmente, pasando la una junto a la otra en un movimiento de rotación, como está sucediendo actualmente a lo largo de la falla de San Andrés. Pruebas tales como la existencia actual de antiguas cordilleras y de lo que en otros tiempos fueron fondos marinos en el corazón de los continentes demuestra que toda esta actividad tectónica se ha estado produciendo desde mucho antes de romperse la Pangea, y que los supercontinentes se han fragmentado repetidas veces y se han reconstruido con configuraciones diferentes a causa de la actividad que se desarrolla en la superficie de un planeta que no descansa.



34. Encaje de los continentes antes de la apertura del Atlántico.

En 1969, cuando se creó la Open University en Gran Bretaña, estas teorías y el resto de lo que constituía la tectónica de placas empezaban a resultar ya familiares a los profesionales y se habían publicado en las páginas de revistas de divulgación como *Scientific American* y *New Scientist,* pero todavía no se habían introducido en los libros de texto. Con el fin de ponerse al día, de acuerdo con su imagen vibrante de institución joven, el personal de la Open University escribió rápidamente su propio libro de texto, el primero que se configuraba en torno a la teoría global de la tectónica de placas. Como hay que trazar una línea en algún lugar, se puede considerar (aunque algo arbitra-

riamente) que la publicación de *Understanding the Earth*[16] en 1970, justo al final de la década que vio la «revolución» en las ciencias de la Tierra, fue el momento en que la teoría de la deriva continental se convirtió en la nueva ortodoxia —el último gran triunfo de la ciencia clásica.

Con la aceptación del hecho de que los continentes se habían desplazado quedó establecida una nueva base para la comprensión de otras características de la Tierra, en particular la relación entre los seres vivos y su cambiante entorno global. El valor de la luz que esto aporta se puede ilustrar mediante un ejemplo. Alfred Russell Wallace, durante el tiempo que pasó en las islas del archipiélago malayo, observó que había una clara diferencia entre las especies del noroeste y las del sudeste. Esta región situada entre Asia y Australia está casi completamente llena de islas, cuyo tamaño varía desde el de Borneo y Nueva Guinea, hasta el de los más diminutos atolones, y, a primera vista, no contiene barrera alguna que pueda resultar insuperable para el movimiento de las especies en ambas direcciones. Sin embargo, Wallace descubrió que se puede marcar una estrecha franja en el mapa (conocida actualmente como la línea de Wallace), que se extiende más o menos del suroeste al nordeste entre Borneo y Nueva Guinea, con una fauna asiática claramente diferenciada hacia el noroeste de esta zona de transición, y una fauna australiana claramente diferenciada hacia el sudeste, y con muy escasas zonas en que esta diferencia se difumine. En aquella época esto era un gran misterio, pero se puede explicar en el contexto de la tectónica de placas, donde hay estudios recientes que revelan que durante la fragmentación de la parte sur del supercontinente de Gondwana, Indo-Asía se separó primero y se desplazó hacia el noroeste, donde la selección natural ejerció unas presiones evolutivas distintas de las que actuaron en el continente Australia-Antártida, que se había quedado atrás. En una fase de actividad tectónica posterior,

Australia-Nueva Guinea se separó de la Antártida y se desplazó rápidamente (para lo habitual en la velocidad de desplazamiento de los continentes) hacia el norte, alcanzando finalmente a Asia. Los dos continentes han vuelto recientemente a aproximarse de nuevo, y todavía no ha habido tiempo para que las especies de ambos lados se mezclen en una proporción significativa cruzando la línea de Wallace. El propio Wegener comentó esta posibilidad (en la tercera edición de su libro, en 1924, sólo sesenta y cinco años después de que Darwin y Wallace publicasen su teoría de la selección natural, y once años después de la muerte de Wallace); pero fue necesaria la teoría de la tectónica de placas para explicar esta cuestión.

La deriva continental es importante para explicar muchos aspectos de la evolución de la vida en la Tierra, y es especialmente relevante para el tema que tratamos aquí: el modo en que la ciencia ha pulido nuestros conocimientos sobre la relación existente entre los seres humanos y el universo en sentido amplio, y nuestro continuo avance desde una fase central gracias a los nuevos descubrimientos. Como Wallace, Charles Darwin explicó cómo actúa la evolución, pero aparte de dedicarse a esto, Darwin era geólogo y seguramente le hubiera intrigado y encantado conocer las nuevas teorías sobre el modo en que la deriva continental y el clima se han asociado para configurar nuestra especie. El relato comienza con la historia de los períodos glaciales.

La historia de las glaciaciones: Jean de Charpentier

Incluso antes del comienzo del siglo XIX hubo quienes pensaron que la glaciación en Europa había sido mucho más extensa en el pasado que en la actualidad. La prueba más obvia de este hecho es la presencia de enormes cantos rodados que están depositados lejos de los estratos a los que pertenecen, debido a

que fueron transportados hasta allí por los glaciares, que desde entonces no han cesado de fundirse y retroceder —desde luego, no sorprende que una de las primeras personas que llamó la atención sobre estos depósitos «erráticos» fuera un suizo, Bernard Kuhn, en 1787—. En cambio, sí es más sorprendente que se le ocurriera esta idea siendo una persona que formaba parte del clero; los conocimientos que se transmitían en aquella época hablaban de que todos aquellos fenómenos podían explicarse como efectos del diluvio bíblico, independientemente de lo que los habitantes de las montañas pudieran pensar a partir de las pruebas que les proporcionaba su contacto cotidiano con los efectos producidos por los glaciares. Casi todos aceptaban los conocimientos que habían recibido, y los defensores de la idea de que la glaciación explicaba los depósitos erráticos constituyeron durante décadas una minoría muy reducida. Entre éstos se encontraba James Hutton, que se convenció tras ver las pruebas durante una visita a las montañas del Jura; también cabe citar al noruego Jens Esmark, que escribió sus informes durante la década de 1820, y al alemán Reinhard Bemhardi, que supo de los trabajos de Esmark y publicó un artículo en 1832, en el que sugería que el casquete glaciar del polo había llegado en otros tiempos por el sur hasta el centro de Alemania. Esto sucedía sólo un año antes de que Charles Lyell planteara la teoría de que los depósitos erráticos en realidad habían sido transportados por el hielo, pero no por los glaciares —en el tercer volumen de *Principles of Geology* sugería que los grandes cantos rodados podían haberse desplazado incrustados en icebergs o depositados sobre plataformas de hielo, que flotarían en la superficie de las aguas durante el diluvio universal—. Pero la cadena de teorías que desembocó finalmente en un auténtico modelo de los períodos glaciales, no comenzó con ninguno de los grandes nombres de la ciencia del siglo XIX, sino con un montañero suizo, Jean-Pierre Perraudin.[17]

En los valles de montaña que entonces estaban sin hielos, Perraudin observó cómo las superficies de rocas duras, que no podían ser afectadas por la intemperie fácilmente, estaban recorridas por cicatrices producidas por algo que había presionado fuertemente sobre ellas, y constató que la explicación más verosímil era que habían sido escopleadas o raspadas por las rocas que habían arrastrado los antiguos glaciares. En 1815, escribió sobre estas teorías a Jean de Charpentier, que así se llamaba entonces y era un ingeniero de minas, además de un conocido naturalista que se interesaba por la geología más allá de lo que requería estrictamente el ejercicio de su profesión. Nació como Johann von Charpentier, en 1786, en la ciudad alemana de Freiberg, pero se trasladó a Suiza en 1813 y adoptó la versión francesa de su nombre; permaneció allí, concretamente en Bex, en el valle del Aar, durante el resto de su vida, hasta su muerte, acaecida en 1855. La idea de que los depósitos erráticos fueran transportados por los glaciares le parecía a Charpentier demasiado extravagante como para ser aceptada en aquella época, aunque tampoco le impresionaba la teoría de que el agua los hubiera arrastrado hasta los lugares en que se encontraban en aquel momento. Perraudin continuó, como un intrépido, presentando sus pruebas a cualquiera que quisiera oírle y encontró un oyente receptivo en Ignace Venetz, un ingeniero de caminos cuya profesión, como en Charpentier la suya, fomentaba en él un amplio conocimiento de la geología. Venetz se fue convenciendo gradualmente ante la evidencia, incluyendo entre las pruebas los montones de detritos hallados varios kilómetros más allá del final del glaciar de Flesch. Estos montones de detritos parecían ser morrenas terminales (montones de basura geológica que había quedado en los extremos finales de los glaciares) de una época en que el glaciar se extendía más abajo por el valle. En 1829 presentó su argumentación a favor de la anterior glaciación en la reunión anual de la Sociedad Sui-

za de Ciencias Naturales, donde prácticamente la única persona a la que convenció fue Charpentier, un viejo conocido con quien ya había comentado algunas de estas teorías. Fue Charpentier quien tomó entonces el relevo, reuniendo más pruebas durante los cinco años siguientes y presentando una argumentación aún más minuciosa en la Sociedad de Ciencias Naturales en 1834. Esta vez, dio la impresión de que nadie quedaba convencido (quizás en parte debido a que el modelo de transporte en el hielo de Lyell parecía resolver algunos de los misterios que surgían al explicar los depósitos erráticos recurriendo al diluvio universal). De hecho, un miembro de la audiencia, Louis Agassiz, se irritó tanto al oír mencionar estos conceptos que, siguiendo la mejor tradición científica, expresó su desaprobación y exigió que se dejara de hablar de tales tonterías de una vez por todas.

Louis Agassiz y el modelo glacial

Agassiz (que fue bautizado con los nombres Jean Louis Rodolphe, pero siempre fue conocido como Louis) era un joven que vivía con prisa. Nació en Motier-en-Vuly, en Suiza, el 28 de mayo de 1807, y estudió medicina en Zurich, Heidelberg y Munich, antes de trasladarse en 1831 a París, donde recibió la influencia de Georges Cuvier, que entonces estaba ya cerca del final de su vida. Para entonces Agassiz ya se había interesado por la paleontología y pronto se convirtió en el experto en peces fósiles más destacado a nivel mundial. En 1832, Agassiz regresó a Suiza, donde fue nombrado catedrático de historia natural en una facultad universitaria y un museo de historia natural recientemente creados en Neuchátel, la capital de la región donde él se había criado. Esta zona de Suiza tenía en aquella época un doble estatus que resultaba curioso. A partir de 1707, aunque era una zona francófona, formó parte de los dominios del rey

de Prusia (excepto durante un breve interregno napoleónico). En 1815, Neuchátel se unió a la Confederación Helvética, pero el vínculo con Prusia no fue reconocido formalmente, ni tampoco revocado formalmente (una de las razones por las que Agassiz estudió en Alemania) y la facultad universitaria recientemente creada se mantenía con fondos prusianos. Cuando tomó posesión de la cátedra, Agassiz ya conocía a Charpentier (se habían conocido cuando Agassiz era todavía un escolar en Lausana), al que admiraba y respetaba, y había visitado al anciano aprovechando para trabajar unas vacaciones durante las cuales estuvieron estudiando la geología de la región situada alrededor de Bex. Charpentier intentó convencer a Agassiz de que había existido una gran glaciación; Agassiz intentó encontrar pruebas de que no había existido.

Después de pasar otro verano haciendo geología con Charpentier en los alrededores de Bex durante 1836, Agassiz se quedó completamente convencido y asumió la defensa de esta idea con todo el ardor evangélico de un converso. El 24 de junio de 1837 asombró a los sabios miembros de la Sociedad Suiza de Ciencias Naturales (reunidos precisamente en Neuchátel) al dirigirse a ellos, en sus funciones de presidente, no con una conferencia anticipada sobre peces fósiles, sino con una apasionada presentación a favor del modelo glacial, en la que utilizó el término *período glacial* (*Eiszeit*; Agassiz consiguió este término como un préstamo del botánico Karl Schimper, unos de sus amigos y colegas). Esta vez la idea realmente causó sensación. No es que la gente estuviera convencida, sino que el entusiasmo de Agassiz, y su posición como presidente, hicieron que la idea no pudiera ser ignorada. Incluso consiguió arrastrar a las montañas a los miembros de la Sociedad que aún era reacios, para que vieran las pruebas por sí mismos, señalándoles las cicatrices que la glaciación había dejado en las rocas duras (algunos todavía pretendieron explicar que aquellas cicatrices eran las hue-

llas que habían dejado unos carros al pasar por allí). Sus colegas se quedaron impasibles, pero Agassiz, en cualquier caso, siguió adelante, decidido a encontrar pruebas irrefutables que respaldaran el modelo del período glacial. Para ello, Agassiz instaló un pequeño observatorio (en realidad una pequeña cabaña) sobre el glaciar de Aar con el fin de medir el movimiento del hielo hincando estacas en él y anotando la velocidad a la que avanzaba. Con gran sorpresa por su parte, en las visitas que realizó durante los veranos de los tres años siguientes descubrió que el hielo se movía aún más rápido que lo que él había previsto y que, en su avance, incluso podía transportar enormes cantos rodados. Entusiasmado con estos descubrimientos, en 1840 Agassiz publicó (privadamente, en Neuchátel) su libro titulado *Études sur les Glaciers (Estudios sobre los glaciares),* que sirvió para asentar firmemente el modelo del período glacial en el ruedo del debate público.

De hecho, Agassiz se lanzó totalmente al ataque. Es muy difícil no sorprenderse y tomar nota (a favor o en contra) cuando un científico argumenta que en otros tiempos todo el planeta estuvo cubierto por el hielo y que defiende sus ideas con el tipo de lenguaje que vemos a continuación:

> El desarrollo de estas enormes capas de hielo debió tener como consecuencia la destrucción de toda la vida orgánica sobre la superficie de la Tierra. El suelo de Europa, cubierto anteriormente por una vegetación tropical y habitado por manadas de elefantes gigantescos, hipopótamos enormes y animales carnívoros descomunales, quedó enterrado «repentinamente» bajo una vasta extensión de hielo que cubría las llanuras, los lagos, los mares y las mesetas por igual. A esto siguió el silencio de la muerte… los brotes se secaron, las corrientes de agua cesaron de fluir, y los rayos de sol que se alzaban sobre aquella tierra helada… se encontraban sólo con el silbido de los vientos del norte y con el sonido cavernoso de las grietas que se abrían rasgando la superficie de aquel enorme océano de hielo.

Estas fantásticas exageraciones consiguieron enojar incluso a Charpentier, que publicó en 1841 su propio informe sobre el modelo del período glacial (más sobrio, aunque menos entrete-

nido). Esta versión de las glaciaciones presentada por Charpentier relegó a la de Agassiz al terreno de los catastrofistas, como se desprende del término *repentinamente,* reduciendo así sus posibilidades de hallar aceptación por parte de Lyell y sus seguidores. Pero las pruebas continuaron acumulándose y, finalmente, resultó imposible seguir ignorando el hecho de que había existido al menos un gran período glacial; no hubo que esperar demasiado tiempo para que Lyell se convenciera de que al modelo se le podía quitar sus adornos catastrofistas y hacerlo así aceptable para los actualistas (o uniformitarianistas).

Varios años atrás, Agassiz había visitado Gran Bretaña para estudiar algunas colecciones de peces fósiles, y pasó un cierto tiempo en Oxford con William Buckland, el viejo mentor de Lyell (aunque era un catastrofista declarado), con el que entabló amistad. Un año después de que Agassiz hubiera sobresaltado a sus colegas con su conferencia de Neuchátel, Buckland asistió a un congreso científico en Freiberg, donde oyó a Agassiz exponer sus teorías, y luego continuó viaje hasta Neuchátel en compañía de su esposa para ver las pruebas por sí mismo. Estaba intrigado, pero no se convenció inmediatamente. Sin embargo, en 1840, Agassiz hizo otro viaje a Gran Bretaña para estudiar los peces fósiles y aprovechó la ocasión para asistir a la reunión anual de la British Association for the Advancement of Science (que aquel año se celebró en Glasgow) y presentar allí su modelo del período glacial. Después de la reunión, Agassiz se unió a Buckland y a otro geólogo, Robert Muchison (1792-1871), para recorrer Escocia haciendo trabajo de campo, y las pruebas a favor del modelo encontradas durante su recorrido convencieron finalmente a Buckland de que Agassiz tenía razón. A continuación, Agassiz prosiguió su viaje hacia Irlanda, mientras Buckland visitaba Kinnordy, adonde Charles y Mary Lyell se habían trasladado para pasar una temporada, después de la reunión de Glasgow. En unos días, aprovechando las pruebas de

una antigua glaciación que se podían observar en el entorno inmediato, Buckland consiguió convencer a Lyell, y el 15 de octubre de 1840 escribió a Agassiz lo siguiente:

> ¡Lyell ha aceptado plenamente la teoría que usted propone! Al mostrarle yo un hermoso grupo de morrenas situado a menos de dos millas de la casa de su padre, aceptó la teoría al instante como algo que le permitía resolver una cantidad enorme de dificultades que le había traído de cabeza durante toda su vida, y no sólo éstas, sino otras morrenas similares y detritos de morrenas que cubren la mitad de los condados vecinos pueden explicarse mediante la teoría elaborada por usted, y Lyell ha aceptado mi propuesta de reflejar todo esto en un mapa del condado y explicarlo en un informe que leerá en la Geological Society al día siguiente de que usted haga su exposición.[18]

La conversión de Lyell a la nueva teoría no fue tan dramática como parece, puesto que, como muestra el texto citado, ya había estado dándole vueltas al origen que podrían tener estos fenómenos geológicos; había visitado también Suecia en 1834, y es imposible que no observara allí las pruebas de que había tenido lugar una glaciación, aunque no las interpretara así de inmediato. A diferencia del diluvio universal, la glaciación encajaba en el uniformitarianismo —después de todo, también hoy en día hay glaciares en la Tierra.

Buckland mencionaba en aquella carta que iba a celebrarse en Londres una futura reunión de la Geological Society, en la cual ya estaba previsto que Agassiz participara como orador. Finalmente, hubo ponencias del propio Agassiz, de Buckland y de Lyell, todas defendiendo el modelo del período glacial, que se expusieron en dos reuniones de la Geological Society y se leyeron el 18 de noviembre y el 2 de diciembre. Pasarían otros veinte años o más antes de que el modelo fuera aceptado plenamente, pero para los aspectos que aquí nos interesan, podemos citar estas reuniones, donde geólogos destacados y reconocidos como Buckland y Lyell comenzaron a predicar el evangelio, como el momento en que el modelo del período glacial salió del frigorífico. La siguiente pregunta crucial que habría que res-

ponder sería: «¿Qué fue lo que hizo que la Tierra se enfriara durante los períodos glaciales?». Sin embargo, antes de que veamos cómo se respondió a esta pregunta, debemos echar un rápido vistazo a lo que le sucedió a Agassiz después de 1840.

En 1833, Agassiz había contraído matrimonio con Cécile Braun, una muchacha que había conocido cuando era estudiante en Heidelberg. La pareja fue muy feliz al principio y tuvo un hijo (Alexander, nacido en 1835) y luego dos hijas (Pauline e Ida). Sin embargo, hacia mediados de la década de 1840, la relación entre Agassiz y su esposa se había deteriorado y en la primavera de 1845 Cécile se marchó de Suiza para vivir con su hermano en Alemania, llevándose consigo a sus dos hijas pequeñas, pero dejando con su padre al hijo mayor para que terminara los estudios que había empezado en Suiza. Hacia esta época existía un factor que contribuyó a la ruptura del matrimonio: Agassiz atravesaba un período de serias dificultades financieras debidas a su imprudente participación en un negocio editorial que no tuvo éxito. Con este panorama, en 1846 se marchó de Europa para lo que se suponía que iba a ser un viaje de un año de duración a Estados Unidos, donde tenía previsto observar los fenómenos geológicos del Nuevo Mundo con sus propios ojos y dar una serie de conferencias en Boston. Se quedó encantado de ver las abundantes pruebas de glaciación que encontró allí —para dar con algunas de ellas, bastaba con dar un paseo desde los muelles de Halifax, Nueva Escocia, donde el barco ancló antes de seguir viaje a Boston— y de descubrir que sus teoría sobre los períodos glaciales no sólo le habían precedido a través del Atlántico, sino que habían sido aceptadas por la mayoría de los geólogos americanos. Estos estuvieron también encantados con Agassiz y decidieron ayudarle. En 1847 se fundó especialmente para él una nueva cátedra en Harvard, lo cual resolvía sus problemas económicos y le proporcionaba una situación académica segura. Se convirtió en catedrático de

zoología y geología, instalándose allí para el resto de su vida y fundando el Museo de Zoología Comparada en 1859 (el año en que se publicó *El origen de las especies* de Darwin). Agassiz ejerció una influencia importante en el desarrollo de la metodología utilizada en Estados Unidos para enseñar los temas en los que él había trabajado, insistiendo en la necesidad de investigar directamente los fenómenos naturales; además fue un conferenciante muy popular que contribuyó a difundir el interés por la ciencia fuera de las universidades. Sin embargo, nadie es perfecto: durante los últimos años de su vida, Agassiz se negó a aceptar la teoría de la selección natural.

Su emigración a América resultó ser oportuna, tanto por razones políticas, como por otras razones personales. En 1848, la oleada de sucesos revolucionarios que tuvieron lugar en Europa alcanzó también Neuchâtel y se rompieron finalmente los vínculos de esta ciudad con Prusia. La facultad universitaria, que había sido elevada al rango de academia en 1838, siendo Agassiz su primer rector, perdió sus subvenciones y tuvo que cerrar. La agitación que recorrió Europa indujo a muchos naturalistas a cruzar el Atlántico, acudiendo algunos de ellos a trabajar con Agassiz, con lo que los trabajos que se realizaban en Harvard recibieron un buen impulso. También en 1848 llegó de Europa la noticia de que Cécile había muerto de tuberculosis y Pauline e Ida se habían ido a vivir con su abuela suiza, Rose Agassiz, mientras su hermano mayor, que se había reunido con la familia en Freiburg un año antes, permanecía en esta ciudad con su tío para terminar su período de escolarización. En 1849, Alexander se reunió con Louis en Cambridge, Massachusetts; acabó convirtiéndose en un destacado naturalista y fundó la rama americana de la familia Agassiz. En 1850, Louis se casó en segundas nupcias con Elizabeth Cary e hizo que sus dos hijas, de 13 y 9 años de edad respectivamente, se trasladaran desde a Europa a Estados Unidos para reunirse con la fami-

lia. Durante casi un cuarto de siglo Agassiz disfrutó tanto de la felicidad doméstica como del éxito académico en su nuevo país. Falleció en Cambridge el 14 de diciembre de 1873.

La teoría astronómica de las glaciaciones

Las raíces de lo que a veces se llama teoría astronómica de las glaciaciones se remontan al descubrimiento que hizo Johannes Kepler a principios del siglo XVII, cuando constató que las órbitas de los planetas (incluida la Tierra) alrededor del Sol son elípticas, y no circulares. Pero la historia comienza realmente en 1842 —poco después de que Agassiz hubiera publicado su propio libro sobre los períodos glaciales— con la publicación de un libro titulado *Révolutions de la mer* (*Revoluciones del mar*), cuyo autor era el matemático francés Joseph Adhémar (1797-1862). Dado que la Tierra se mueve describiendo una elipse alrededor del Sol, en una parte de su órbita (durante parte del año) está más cerca del Sol que cuando se encuentra en el otro extremo de su órbita (durante la otra mitad del año). Además, el eje sobre el que gira la Tierra está inclinado con respecto a una línea imaginaria que uniera la Tierra en rotación con el Sol, formando dicho eje un ángulo de 23 grados y 30 minutos con la vertical a dicha línea. Debido al efecto giroscópico de la rotación de la Tierra, en una escala temporal de años o siglos, esta inclinación siempre apunta en la misma dirección con respecto a las estrellas, lo que significa que, a medida que vamos girando alrededor del Sol, primero se inclina hacia el Sol un hemisferio y luego el otro, siendo uno de ellos cada vez el que recibe preferentemente el calor del Sol—. Esta es la razón por la que tenemos las estaciones.[19] Una vez al año, el 4 de julio, la Tierra se encuentra a una distancia máxima del Sol, y es el 3 de enero cuando está más cerca de este astro —pero la diferencia supone menos del 3 por 100 de los 150 millones de kilómetros

que se pueden considerar como distancia media al Sol. Cuando la Tierra está más lejos del Sol es durante el verano del hemisferio norte y, por consiguiente, es entonces cuando se desplaza a la velocidad más lenta que registra recorriendo su órbita (recordemos las leyes de Kepler). Adhémar expuso el siguiente razonamiento (correcto): dado que la Tierra se mueve más lentamente cuando es invierno en el hemisferio sur, el número de horas de oscuridad total que se viven en el polo Sur en invierno, es mayor que el número de horas de luz solar continua que se registran en dicha región durante el verano del hemisferio sur, cuando la Tierra está en el extremo opuesto de su órbita y se desplaza a la velocidad máxima. Adhémar pensaba que, según el significado de todo esto, la región polar del sur se iba enfriando a medida que transcurrían los siglos, y que el casquete glaciar de la Antártida (que en su opinión estaba creciendo) era la prueba de ello.

El modelo de la órbita elíptica

Sin embargo, esto mismo puede suceder al revés. Al igual que una peonza, la Tierra se bambolea mientras rota, pero, dado que es mucho más grande que la peonza de un niño, el bamboleo (conocido como precesión de los equinoccios) es lento y majestuoso. Es la causa de que la dirección a la que apunta el eje de rotación de la Tierra con respecto a las estrellas describa un círculo en el cielo una vez cada 22 000 años.[20] En consecuencia, hace 11 000 años, la pauta de las estaciones en relación con la órbita elíptica estaba invertida —los inviernos *del norte* se producían cuando la Tierra estaba más alejada del Sol y se desplazaba más lentamente—. Adhémar consideró que tenía que existir un ciclo alterno de períodos glaciales, que afectarían primero al hemisferio sur y luego al hemisferio norte, que se cubriría de hielo 11 000 años más tarde. Adhémar se imaginó

cómo, al final de un período glacial, cuando el hemisferio helado se calentara, los mares roerían la base de un enorme casquete de hielo, desgastándolo hasta dejarlo como un champiñón inestable, hasta que toda la masa de hielo restante se hundiera y se deshiciera en el océano y enviara una enorme ola que se abalanzaría sobre el hemisferio opuesto —de aquí venía el título de su libro—. De hecho, toda la base del modelo de Adhémar era tan inestable como las placas de hielo que en su imaginación se hundían y se deshacían. La idea de que un hemisferio de la Tierra se calienta mientras el otro se enfría es del todo equivocada. Como señaló en 1852 el científico alemán Alexander von Humboldt (1769-1859), unos cálculos astronómicos realizados cien años atrás, que se remontan a los trabajos del matemático francés Jean d'Alembert (1717-1783), demostraban que el efecto de enfriamiento en que se basaba Adhémar queda compensado totalmente por el calor suplementario que ese mismo hemisferio recibe durante el verano, cuando la Tierra está en la posición más próxima al Sol (y esto es exacto, ya que ambos efectos dependen de la ley del inverso del cuadrado). La cantidad total de calor que recibe cada hemisferio en el transcurso de un año siempre es igual a la cantidad total de calor que recibe el hemisferio opuesto durante ese mismo año. Por supuesto, en el siglo XX, cuando se llegó a conocer mejor el registro geológico y se dispuso de técnicas radioactivas para la datación, quedó claro que no existe una pauta alterna de glaciaciones en el sur y en el norte cada 11 000 años. Sin embargo, aunque el modelo de Adhémar era erróneo, su libro sirvió como estímulo para que en la historia de la ciencia surgiera otra persona que tomara el relevo en el estudio de las influencias orbitales sobre el clima.

James Croll

James Croll nació en Cargill, Escocia, el 2 de enero de 1821. La familia poseía una pequeña parcela de tierra, pero su principal fuente de ingresos era el trabajo del padre de Croll como cantero. Este oficio le obligaba a estar de viaje durante largas temporadas, mientras su familia tenía que encargarse de sacar adelante la granja. El muchacho recibió sólo una educación elemental, pero leía ávidamente y aprendió los fundamentos de la ciencia a partir de los libros. Intentó trabajar en distintos oficios, comenzando como constructor de molinos, pero descubrió que algo curioso le sucedía: «la fuerte tendencia natural de mi mente a pensar de manera abstracta me incapacitaba en cierto modo para los detalles prácticos del trabajo cotidiano».[21] La situación se complicó aún más cuando su codo izquierdo, lesionado en un accidente que sufrió siendo todavía un muchacho, se fue anquilosando casi hasta el punto de quedar inútil la articulación. Esto supuso para Croll una limitación de las oportunidades que podía tener para trabajar, pero le dio aún más tiempo para pensar y leer. Escribió un libro, *The Philosophy of Theism*, que se publicó en Londres en 1857 y, sorprendentemente, consiguió pocos beneficios. Dos años más tarde encontró su trabajo ideal al conseguir un puesto como portero en el Andersonian College and Museum de Glasgow. «Después de todo», escribió Croll, «nunca he estado en un lugar tan apropiado para mí… Mi salario era pequeño, eso es cierto, poco más de lo suficiente para poder subsistir; pero esto se veía compensado por ventajas de otro tipo». Se refería a tener acceso a la excelente biblioteca científica del Andersonian College, a la paz y la tranquilidad, y a disponer de mucho tiempo para pensar. Una de las cosas que Croll leyó allí fue el libro de Adhémar; uno de los temas sobre los que reflexionó fue el modo en que los cambios en la forma de la órbita terrestre podían afectar al clima.

Esta idea surgió a partir del análisis detallado del modo en que la órbita de la Tierra cambia con el tiempo, un análisis que había llevado a cabo el matemático francés Urbain Leverrier (1811-1877). A Leverrier se le recuerda sobre todo por los trabajos que desembocaron en el descubrimiento del planeta Neptuno en 1846, aunque John Couch Adams (1819-1892) realizó en Inglaterra, de manera independiente, los mismos cálculos. Aquellos trabajos de Leverrier fueron una tarea realizada a fondo y predecían la existencia de Neptuno basándose en la leyes de Newton y en el modo en que las órbitas de otros planetas se veían perturbadas por una influencia gravitatoria invisible, tras haberse reconocido la influencia gravitatoria que todos los planetas conocidos ejercían los unos sobre los otros. Fue algo mucho más transcendente que el descubrimiento de Urano realizado por William Herschel (1738-1822) en 1781, aunque este descubrimiento causara gran emoción a nivel popular por ser el primer planeta descubierto desde la Edad Antigua. El descubrimiento de Herschel fue cuestión de suerte (en la medida en que construir el mejor telescopio del mundo y ser un observador excelente es cuestión de suerte). En cambio, la existencia de Neptuno se predijo matemáticamente (como el regreso del cometa Halley en 1758) y el hecho constituyó una gran vindicación de las leyes de Newton y del método científico. Sin embargo, esta predicción requirió unos cálculos terriblemente laboriosos con papel y lápiz en una época en que no existían ordenadores, pero uno de los frutos de aquellos trabajos fue el análisis más preciso realizado hasta entonces sobre el modo en que cambia la forma de la órbita de la Tierra, en una escala temporal de aproximadamente 100 000 años. A veces la órbita es más elíptica y otras veces más circular. Aunque la cantidad «total» de calor que el planeta recibe del Sol durante un año completo es siempre la misma, cuando la órbita es circular, la cantidad de calor que llega al planeta desde el Sol cada semana es la misma

a lo largo de todo el año; cuando la órbita es elíptica, se recibe más calor durante una semana en la que la Tierra está cerca del Sol, que en una semana en la que la Tierra está al otro extremo de su órbita. Croll se preguntaba si esto podría explicar los períodos glaciales.

El modelo que Croll desarrolló partía del hecho de que se produciría un período glacial en cualquier hemisferio que sufriera unos inviernos muy duros; combinó los cambios de excentricidad de la elipse calculados por Leverrier con el efecto de la precesión de los equinoccios para construir un modelo en el que los períodos glaciales alternos de cada hemisferio se encuadraban en una era glacial cuya duración sería de cientos de miles, de años. Según este modelo, la Tierra había estado en una era glacial desde hace aproximadamente 250 000 años hasta hace unos 80 000 años, y desde entonces se encontraba en un período caliente entre eras glaciales, denominado período interglacial. Croll entró aún más en detalles, dando incluso una explicación coherente sobre el papel que desempeñaban las corrientes oceánicas en el clima, y publicó una serie de informes que comenzó con su primer artículo sobre períodos glaciales publicado en el *Philosophical Magazine* en 1864, cuando él tenía 43 años. Sus trabajos atrajeron inmediatamente la atención de muchos, y Croll no tardó en satisfacer su ambición de toda la vida de convertirse en un científico con dedicación exclusiva. En 1867, aceptó un puesto en la Geological Survey of Scotland, y en 1876, el año siguiente a la publicación de su libro *Climate and Time*, fue elegido miembro de la Royal Society (posiblemente, entre todos los que recibieron ese honor, fuera el único que había sido antes portero). En 1885, cuando tenía ya 64 años, publicó otro libro titulado *Climate and Cosmology*. Croll murió en Perth el 15 de diciembre de 1890. Tuvo tiempo de ver cómo su modelo del período glacial encontraba una amplia aceptación y ejercía una gran influencia, a pesar de que, en

realidad, había muy pocas pruebas geológicas consistentes que pudieran respaldarlo.

En *Climate and Time*, Croll había indicado cuál podía ser el camino para seguir perfeccionando el modelo astronómico de los períodos glaciales, sugiriendo que los cambios en la inclinación del eje de la Tierra podrían también desempeñar un papel en dicho modelo. Se trata de la inclinación, actualmente de 23 grados y medio, que es la causa de las estaciones. En los tiempos de Croll se sabía que la inclinación cambia (con un balanceo hacia arriba y hacia abajo, entre unas desviaciones extremas de irnos 22 grados y unos 25 grados con respecto a la vertical), pero nadie, ni siquiera Leverrier, había calculado con precisión cuánto se inclinaba, ni cuál era la escala de tiempo de este movimiento (en realidad, tarda alrededor de 40 000 años en inclinarse desde su posición más vertical hasta la posición inferior y volver a subir hasta la posición inicial). Croll especuló con la idea de que cuando el eje de la Tierra está en la posición más vertical, sería más probable que se produjera un período glacial, ya que entonces ambas regiones polares recibirían menos calor del Sol, aunque esto no pasaba de ser una conjetura. Sin embargo, a finales del siglo XIX, todas estas teorías empezaron a caer en desgracia, a medida que comenzaron a acumularse las pruebas geológicas que evidenciaban que desde el último período glacial no habían transcurrido 80 000 años, sino entre 10 000 y 15 000 años, lo cual suponía una discrepancia total con la hipótesis de Croll. Hace 80 000 años, el hemisferio norte, en vez de estar calentándose, estaba entrando en la fase más fría del último período glacial —justo lo contrario de lo que exigía el modelo de Croll (y una clave importante que nadie tomó en cuenta en aquella época)—. Al mismo tiempo, los meteorólogos calcularon que los cambios en la cantidad de calentamiento solar producidos por estos factores astronómicos, aun siendo reales, eran demasiado pequeños para expli-

car las grandes diferencias de temperatura entre los períodos interglaciales y los períodos glaciales. Sin embargo, las pruebas geológicas demostraron por aquel entonces que había existido toda una sucesión de períodos glaciales y, si no surgía otra cosa, el modelo astronómico predecía un ritmo repetido de ciclos de glaciación. La persona que asumió la desalentadora tarea de perfeccionar los cálculos astronómicos y ver si los ciclos se ajustaban a los modelos geológicos fue el ingeniero serbio Milutin Milankovitch, que nació en Dalj el 28 de mayo de 1879 (lo que le hacía ser sólo dos meses más joven que Albert Einstein).

El modelo de Milankovitch

En aquellos días, Serbia acababa de convertirse en un reino independiente (en 1882), después de siglos de dominación extranjera (principalmente la de los turcos), aunque había sido un principado autónomo bajo soberanía turca desde 1829. Se podía considerar a Serbia como parte de un fermento de Estados balcánicos que gradualmente iban adquiriendo su independencia en una zona situada entre el Imperio turco que se derrumbaba al sur y el Imperio austrohúngaro al norte, que tampoco gozaba de buena salud. Milankovitch, a diferencia de Croll, recibió una educación convencional y se graduó en el Instituto Tecnológico de Viena, obteniendo el doctorado en 1904. Después, se quedó en Viena y trabajó como ingeniero (en el diseño de grandes estructuras de hormigón) durante cinco años, hasta que regresó a Serbia, en 1909, tras conseguir la cátedra de matemáticas aplicadas en la Universidad de Belgrado. En comparación con las brillantes luces de Viena, donde Milankovitch podía haber hecho una buena carrera profesional, Belgrado tenía mucho de lugar apartado y retrasado, pero Milutin deseaba ayudar al país en que había nacido, que necesitaba más ingenieros bien preparados, y decidió hacer todo lo que pudiera como

profesor. Enseñó mecánica, por supuesto, y también física teórica y astronomía. Sobre la marcha recobró asimismo su gran obsesión por el clima. Mucho más tarde,[22] hablaría románticamente del momento en que decidió desarrollar un modelo matemático para explicar los distintos climas de la Tierra, Venus y Marte: situó la decisión en una conversación sostenida tras haber bebido abundantemente durante una cena en 1911, cuando tenía 32 años, aunque quizá sea mejor tomarse esta declaración con reservas. Lo importante es que, en torno a aquella época, Milankovitch inició realmente un proyecto cuyo objetivo era no sólo calcular cómo tendrían que ser las temperaturas en aquel momento en lugares de los tres planetas situados a diferentes latitudes (aportando un modo de verificar el modelo astronómico comparándolo con las observaciones realizadas, al menos en la Tierra), sino también determinar cómo habían variado esas temperaturas por efecto de los ritmos astronómicos cambiantes —con temperaturas reales, no sólo la afirmación más imprecisa de que en determinados momentos de estos ciclos un hemisferio de la Tierra estaba más frío que en otros momentos—. Todo esto no se podía recalcar sin ayudas mecánicas —simplemente con potencia mental, lápiz (o pluma) y papel—, sobre todo no siendo sólo para un planeta, sino para tres. El estudio fue mucho más allá de todo lo que Croll había tenido en cuenta: a pesar de que Milankovitch comenzó con una ventaja enorme al descubrir que el matemático alemán Ludwig Pilgrim ya había calculado (en 1904) el modo en que las tres pautas básicas de excentricidad, precesión e inclinación habían cambiado durante el último millón de años, aún así el científico serbio necesitó tres décadas para realizar la tarea de una manera completa.

El clima en una zona de un planeta está determinado por la distancia de dicho planeta al Sol, la latitud de la zona en cuestión y el ángulo con el que los rayos solares chocan contra el

suelo a esa latitud.[23] Estos cálculos parecen sencillos en principio, pero resultan increíblemente tediosos en la práctica, y se convirtieron en una parte importante de la vida de Milankovitch, ya que le hicieron estar ocupado en su casa durante parte de cada velada. Incluso se llevaba consigo los libros e informes importantes cuando se iba de vacaciones con su esposa y su hijo. En 1912, estalló la primera de una serie de guerras balcánicas. Bulgaria, Serbia, Grecia y Montenegro atacaron al imperio turco, consiguiendo un rápida victoria y ganando territorios. En 1913, en el transcurso de una disputa sobre el botín, Bulgaria atacó a los que hasta entonces habían sido sus aliados y fue derrotada. Por supuesto, todas estas agitaciones que se produjeron en los Balcanes contribuyeron al estallido de la primera guerra mundial en 1914, después del asesinato del archiduque Francisco Femando perpetrado por un serbio bosnio en Sarajevo el 18 de junio de aquel año. Como ingeniero, Milankovitch sirvió en el ejército serbio durante la primera guerra de los Balcanes, pero no en el frente, lo que le dio mucho tiempo para reflexionar sobre sus cálculos. Comenzó a publicar informes sobre sus trabajos, demostrando, entre otras cosas, que el efecto de inclinación era más importante que lo que había sugerido Croll, pero, dado que sus publicaciones estaban en serbio y a causa del período de turbulencia política que Europa estaba viviendo, se les prestó muy poca atención. Cuando estalló la primera guerra mundial, Milankovitch se encontraba de visita en Dalj, su ciudad natal, que fue invadida por el ejército austrohúngaro. Fue hecho prisionero de guerra, pero a finales de año su condición de académico distinguido le valió ser liberado de la prisión y se le permitió vivir en Budapest, donde trabajó realizando sus cálculos durante los cuatro años siguientes. El fruto de este esfuerzo fue una descripción matemática de los climas en la Tierra, Venus y Marte en el momento presente, y este trabajo se publicó en 1920 en un libro que tuvo una amplia y favo-

rable acogida. Este libro incluía también pruebas matemáticas de que las influencias astronómicas podían alterar la cantidad de calor que llegaba a las diferentes latitudes, siendo esta alteración suficiente para provocar períodos glaciales, aunque Milankovitch aún no había desarrollado los detalles. Sin embargo, este aspecto carencial de su trabajo fue inmediatamente asumido por Vladimir Köppen, y dio como resultado una fructífera correspondencia entre Köppen y Milankovitch, además de la posterior incorporación de estas teorías al libro que escribió Köppen, junto con Alfred Wegener, sobre el clima.

Köppen aportó una nueva idea clave al conocimiento del modo en que los ritmos astronómicos afectan al clima en la Tierra. Constató que lo importante no era la temperatura que se registra en invierno, sino la del verano. En latitudes altas (pensaba especialmente en el hemisferio norte), siempre hace el frío suficiente como para que caiga la nieve en invierno. Lo que importa es cuánta de esa nieve permanece sin fundirse durante el verano. Por lo tanto, el factor clave para que se produzcan períodos glaciales es que los veranos sean frescos, no que los inviernos sean extraordinariamente fríos, incluso aunque esos veranos frescos vengan acompañados de inviernos relativamente suaves. Esto es exactamente lo contrario de lo que Croll había pensado, y explica de manera inmediata por qué el último período glacial fue intenso hace unos 80 000 años y terminó hace alrededor de 10 000-15 000 años. Cuando Milankovitch realizó un informe detallado de este fenómeno, calculando las variaciones de las temperaturas en la Tierra en tres latitudes diferentes (55 grados, 60 grados y 65 grados de latitud norte) consiguió lo que parecía ser una buena concordancia entre los ritmos astronómicos y la pauta de períodos glaciales del pasado, según las pruebas geológicas de que se disponía en la década de 1920.

Con la publicidad que dieron a estas teorías Köppen y Wegener en su libro *Los climas en el pasado geológico*, pareció durante un tiempo que el modelo astronómico de los períodos glaciales había madurado por fin hasta convertirse en una teoría hecha y derecha. En 1930, Milankovitch publicó todavía más resultados obtenidos a partir de nuevos cálculos, esta vez correspondientes a ocho latitudes diferentes, para luego continuar extrapolando los cálculos a los ocho años siguientes, en el sentido de pronosticar cómo responderían las capas de hielo existentes frente a los cambios de temperatura. Estaba imprimiéndose un libro que resumía el trabajo de toda su vida, *El canon de insolación y el problema del periodo glacial*, cuando las tropas alemanas, en 1941, invadieron Yugoslavia (que se había fundado tras la primera guerra mundial e incluía a Serbia). A los 63 años de edad, Milankovitch decidió que el tiempo que tenía libre durante la ocupación lo dedicaría a escribir sus memorias, que fueron publicadas finalmente por la Academia Serbia de las Ciencias en 1952. Después de vivir con tranquilidad su época de jubilado, Milankovitch falleció el 12 de diciembre de 1958. Sin embargo, para entonces su modelo había dejado de ser el modelo favorito, ya que las nuevas evidencias geológicas (más detalladas, aunque todavía bastante incompletas) no parecían encajar con dicho modelo tan adecuadamente como habían encajado las pruebas más antiguas y menos precisas.

Las teorías modernas relativas a los períodos glaciales

La verdad es que los datos geológicos sencillamente no eran lo bastante buenos como para resistir una comparación concluyente con el modelo astronómico actual, que es extraordinariamente detallado. Además, el hecho de que un conjunto determinado de datos encajara o no en el modelo no revelaba ninguna verdad profunda en relación con el funcionamiento del pla-

neta. Como sucedió con la teoría de la deriva continental, la auténtica comprobación del modelo no llegaría hasta el momento en que se dispuso de unas mediciones del registro geológico mucho más precisas, para lo cual fueron necesarias técnicas y tecnologías nuevas. Estas mediciones culminaron en la década de 1970, cuando el modelo astronómico (que ahora se denomina frecuentemente «modelo de Milankovitch») ya se había perfeccionado, utilizando computadoras electrónicas, hasta un grado de precisión con el que Milankovitch ni siquiera hubiera llegado a soñar. La prueba geológica crucial surgió a partir de testigos de sedimentos extraídos de los fondos marinos, donde las capas de sedimentos habían ido superponiéndose año tras año, una encima de otra. Estos sedimentos se pueden datar utilizando técnicas de datación que ahora son habituales, entre las cuales cabe citar la técnica radioactiva y la geomagnética, y se descubre que contienen vestigios de criaturas diminutas que vivieron y murieron en los océanos hace mucho tiempo. Estos vestigios aparecen en forma de conchas cretáceas que quedaron depositadas cuando murieron las criaturas que vivían dentro de ellas. Por una parte, las conchas indican qué especies proliferaron en distintas épocas y estos datos constituyen en sí mismos una guía para conocer el clima en dichas épocas; por otra parte, el análisis de los isótopos del oxígeno contenidos en esas conchas puede aportar indicaciones directas sobre la temperatura que había en la época en que aquellas criaturas estaban vivas, porque los seres vivos absorben los distintos isótopos del oxígeno en proporciones diferentes según la temperatura del ambiente y la cantidad de agua que se desprende de las capas de hielo. Los tres ritmos astronómicos se ponen de manifiesto claramente en estos registros como la pulsación del clima cambiante durante el último millón de años o más. En general se considera que el momento en que el modelo quedó definitivamente perfilado es el de la publicación de un informe

crucial en el que se recopilaban todas las pruebas y que apareció en la revista *Science* en 1976,[24] exactamente cien años después de la publicación del libro de Croll *Climate and Time*. Sin embargo, quedó pendiente una intrigante cuestión, que tiene una importancia crucial para nuestra propia existencia. ¿Por qué es la Tierra tan sensible a estos cambios claramente pequeños que se producen en la cantidad de luz solar que llega a las distintas latitudes?

La respuesta nos remite a la deriva continental. Retrocediendo tan sólo un paso desde el primer plano que ocupaba el cambio climático en el modelo de Milankovitch, el registro geológico, que actualmente conocemos bien y hemos datado con precisión, nos dice que el estado natural de la Tierra durante la mayor parte de su historia ha sido la ausencia total de hielo (excepto quizás en las cimas de montañas muy altas). Mientras las corrientes oceánicas calientes puedan llegar hasta las regiones polares, no importa que éstas reciban muy poca luz solar, ya que el agua caliente impide que se forme hielo en el mar. Pero, ocasionalmente, como revelan las cicatrices dejadas por las antiguas glaciaciones, a intervalos de tiempo separados por cientos de millones de años, uno u otro de los hemisferios se sumerge en un período de frío que dura varios millones de años; podemos llamarlo una época glacial, tomando el término utilizado por Croll y dándole un significado similar, pero con una escala temporal más larga. Por ejemplo, en el Pérmico hubo una época glacial que duró irnos 20 millones de año; esta época glacial terminó hace alrededor de 250 millones de años. La explicación de un suceso de este tipo es que, de vez en cuando, la deriva continental transporta una gran superficie de tierra sobre uno de los polos o hasta un lugar próximo al polo. Esto produce dos efectos. En primer lugar, corta (o al menos obstaculiza) el suministro de agua caliente procedente de latitudes inferiores, de tal forma que en invierno la región afectada llega a que-

darse realmente muy fría. En segundo lugar, el continente proporciona una superficie sobre la cual la nieve puede caer, depositarse y acumularse hasta formar una gran capa de hielo o un casquete glaciar. Actualmente, la Antártida constituye un ejemplo activo de este proceso, que produce una época glacial a la que los ritmos astronómicos afectan sólo levemente.

Después de terminar la época glacial que se produjo en el Pérmico (cuyo final se debió al hecho de que la deriva continental abrió camino una vez más a las aguas calientes, permitiendo que llegaran hasta las regiones polares), el planeta disfrutó de irnos 200 millones de años de calor, un tiempo durante el cual proliferaron los dinosaurios. Sin embargo, hace unos 55 millones de años comenzó un enfriamiento gradual y hace 10 millones de años volvieron los glaciares, primero a las montañas de Alaska y, poco después, a la Antártida, donde el casquete glaciar creció tanto que, hace cinco millones de años, su tamaño era mayor que el actual. El hecho de que los glaciares se extendieran por ambos hemisferios al mismo tiempo es un fenómeno importante. Mientras la Antártida cubría el polo Sur y los glaciares se iban formando allí tal como ya hemos explicado, la región del polo Norte también se enfrió y acabó helándose, incluso a pesar de que este polo no estaba cubierto por tierra firme, sino por el océano Ártico. La causa de esto es que la deriva continental fue cerrando gradualmente un anillo de tierra casi completamente cerrado en torno al océano Ártico, cerrando el paso a gran parte de las aguas calientes que en otro caso hubieran impedido la formación de hielos. Especialmente la presencia de Groenlandia desvía actualmente la corriente del Golfo hacia el este, donde calienta las islas Británicas y la zona noroeste del continente europeo. Se formó una delgada capa de hielo sobre el océano polar y desde hace unos tres millones de años hay mucho más hielo sobre las tierras que lo rodean. Esta situación, en la que el océano polar está rodeado de tierra sobre

la cual la nieve puede caer y asentarse, pero donde se funde durante los calientes veranos, resulta ser especialmente sensible a los ritmos astronómicos. Durante los últimos cinco millones de años, aproximadamente, ha permanecido en un estado que puede ser único en toda su historia, con casquetes glaciares sobre ambos polos, generados por dos configuraciones geográficas terrestres y marítimas claramente distintas. Esto, y en particular la geografía del hemisferio norte, hace que el planeta sea sensible a los ritmos astronómicos, que se manifiestan con gran intensidad en el registro geológico de los tiempos geológicos recientes.

El impacto sobre la evolución

Dentro de la presente época glacial, el efecto de esta pulsación climática es producir una sucesión de períodos glaciales completos, cada uno de aproximadamente 100 000 años de duración, separados por períodos más templados, como el que estamos viviendo actualmente, que son unos períodos interglaciales de unos 10 000 años de duración. Según esta estimación, el actual período interglacial llegaría a su fin de forma natural dentro de un par de milenios —un tiempo más breve que la duración de la historia humana registrada hasta la fecha—. Pero el futuro queda más allá del alcance de este libro. También hay menos oscilaciones de los cambios climáticos superpuestas a esta pauta principal por la combinación de ritmos que investigó Milankovitch. La sucesión de estos períodos glaciales, datada por la técnica radioactiva utilizando isótopos del potasio y el argón, comienza hace poco más de 3,6 millones de años. En aquella época, nuestros antepasados vivían en el Gran Valle del Rift (producto de la actividad tectónica de las placas), en África oriental, donde una forma ancestral de homínido dio lugar a tres formas modernas: el chimpancé, el gorila y nosotros mis-

mos.[25] Es precisamente en esa época donde el registro fósil suministra pruebas directas de la existencia de un homínido que andaba erguido: estas pruebas son huellas de los pies impresas en suelos blandos que luego se endurecieron (como las huellas de manos de artistas impresas sobre una acera en Hollywood), y también huesos fósiles. Aunque nadie puede saber con seguridad, sin ayuda de la máquina del tiempo, qué fue exactamente lo que convirtió a un homínido de África oriental en el Homo sapiens hace tres o cuatro millones de años, es fácil suponer que la pulsación del clima desempeñó un papel crucial, y es difícil descartar la conclusión de que esta pulsación climática fue al menos parcialmente responsable. En África oriental, lo importante no fueron tanto las fluctuaciones de las temperaturas —que daban variaciones importantes en latitudes altas— como el hecho de que durante un período glacial completo los océanos están tan fríos que producen menos evaporación y, en consecuencia, menos lluvia, por lo que la Tierra está más seca y los bosques retroceden. Esta situación tuvo que haber aumentado la competencia entre los homínidos de los bosques (incluidos nuestros antepasados), al verse obligados en cierta medida a salir de los bosques y vivir en las llanuras. Allí, existió una fuerte presión selectiva sobre estos individuos y sólo los que se adaptaran al nuevo modo de vida podrían sobrevivir. Si la situación hubiera continuado invariable indefinidamente, podrían haberse extinguido por la competición con los habitantes de las llanuras, que estaban mejor adaptados. Sin embargo, después de aproximadamente cien mil años, las condiciones se suavizaron y los descendientes de los que habían sobrevivido a aquel proceso de criba y selección natural tuvieron oportunidad de aprovechar los bosques en expansión, reproducirse y criar a salvo de los depredadores de las llanuras, y aumentar su número. Repitiendo este proceso diez o veinte veces, es fácil ver como un efecto de trinquete habría seleccionado a los indi-

viduos según su inteligencia y adaptabilidad como requisitos clave para sobrevivir en los bordes de los bosques —mientras que, tras volver al centro del bosque, las líneas de homínidos que tuvieron más éxito se adaptaron aún mejor a la vida en los árboles, y se convirtieron en chimpancés y gorilas.

Esta historia es quizá tan plausible como lo era la teoría de la deriva continental en los tiempos de Arthur Holmes. Pero, incluso si los detalles son incorrectos, es difícil pensar que pueda ser una coincidencia el hecho de que encajen con precisión la pauta climática que empezó hace entre tres y cuatro millones de años y el desarrollo de los seres humanos a partir de los monos de la selva, que también comenzó hace entre tres y cuatro millones de años. Debemos nuestra existencia a la combinación de la deriva continental, que estableció unas condiciones excepcionales ideales para que los ciclos astronómicos afectaran al clima de la Tierra, y los propios ritmos astronómicos. El lote incluye principios físicos básicos (tan básicos como el conocimiento de la convección, que mueve la deriva continental), la dinámica newtoniana y la gravedad (que explica los ciclos astronómicos y hace que éstos sean predecibles), la química (para analizar las muestras procedentes de los fondos marinos), el electromagnetismo (para la datación geomagnética), el conocimiento de las especies y del mundo vivo que desarrollaron con sus trabajos algunos científicos como Ray y Linneo, y la teoría de la evolución por selección natural de Darwin-Wallace. Se trata de una idea que, por una parte, nos pone a nosotros mismos en perspectiva como una de las formas de la vida en la Tierra, creada por el mismo proceso de selección natural que ha creado todas las demás especies, y, por otra parte, corona triunfalmente tres siglos de ciencia «clásica» que comenzaron con los trabajos de Galileo Galilei e Isaac Newton. Podríamos pensar que vale la pena continuar en esta línea. Sin embargo, a finales del siglo XX, buena parte de la ciencia no la ha seguido tan

fielmente, sino que ha ido más allá de la ciencia clásica, introduciendo cambios que son ajenos a los auténticos fundamentos de la visión newtoniana del mundo. Todo comenzó justo al final del siglo XIX, con la revolución cuántica,[26] que alteró completamente el modo en que los físicos reflexionaban sobre el mundo a escalas muy pequeñas.

Quinta Parte

TIEMPOS MODERNOS

Capítulo 13

EL ESPACIO INTERIOR

La invención del tubo de vacío

La mayor revolución de la historia de la ciencia comenzó cuando a mediados del siglo XIX, se inventó un tipo de bomba de vacío que suponía un perfeccionamiento de los tipos que habían existido hasta entonces. Para ver en perspectiva la importancia de este invento, que puede parecer trivial comparado con la tecnología moderna, consideremos el tipo de equipamiento con el que trabajaba Michael Faraday cuando quería investigar el comportamiento de la electricidad en ausencia de aire. A finales de la década de 1830, Faraday estaba investigando las descargas en el vacío utilizando una botella de cristal en la que había un único electrodo fijado en su interior. La boca de la botella estaba «sellada» (suponiendo que ésta sea la palabra adecuada) mediante un corcho, a través del cual se introducía una clavija, que era el otro electrodo y que se podía mover hacia dentro y hacia fuera para colocarlo en distintas posiciones. Este aparato estaba lejos de ser hermético y, en el interior del recipiente, sólo se podía mantener baja la presión mediante un bombeo constante (y aún así en ningún lugar se conseguía el vacío, ni nada parecido), utilizando un equipamiento que, en principio, difería poco de las bombas de vacío utilizadas por Otto von Guericke dos siglos atrás, y que es esencialmente lo mismo que las bombas modernas de inflar las ruedas de las bicicletas. Fue el alemán Heinrich Geissler (1814-1879) quien dio

el paso hacia delante en Bonn a finales de la década de 1850. Su bomba de vacío perfeccionada utilizaba mercurio para hacer un contacto hermético, sellando todas las conexiones y canillas utilizadas en el proceso de sacar el aire de un recipiente de cristal. El recipiente de cristal que se iba a vaciar se conectaba mediante un tubo a una de las ramas de una válvula de doble paso que lo comunicaba con un globo de vidrio, que a su vez estaba conectado mediante un tubo flexible a un depósito lleno de mercurio. La otra rama de la válvula de doble paso conectaba el globo de vidrio con la atmósfera exterior. Con la válvula abierta de forma que el globo de vidrio estuviera conectado con la atmósfera exterior, se alzaba el depósito de mercurio, para que la presión del mercurio hiciera que el aire saliera del globo. Luego se conmutaba la válvula a la otra rama (la del recipiente de cristal donde se quería hacer el vacío) y se bajaba el depósito de mercurio, haciendo así que el aire fluyera desde el recipiente de cristal hacia el interior del globo de vidrio. Repitiendo este proceso un número suficiente de veces, se consigue finalmente un vacío muy «potente» en la botella de cristal. Aún mejor: Geissler, que fue inicialmente soplador de vidrio, desarrolló una técnica para sellar dos electrodos introducidos en un recipiente de cristal en el que se había hecho el vacío, creando así un tubo en el que había un vacío permanente. Había inventado el tubo de vacío. El propio Geissler y otros fueron mejorando esta técnica durante los años y décadas siguientes, hasta que a mediados de la década de 1880 resultó posible hacer tubos de vacío en los que la presión era sólo unas pocas diezmilésimas de la presión atmosférica a nivel del mar en la Tierra. Fue esta tecnología la que condujo al descubrimiento de los electrones («rayos catódicos») y de los rayos X, fomentándose así unos trabajos que desembocarían en el descubrimiento de la radioactividad.

En la década de 1860, Julius Plücker (1801-1868), un catedrático de física de la Universidad de Bonn, que en otro caso hubiera permanecido en el anonimato, tuvo la suerte de ser una de las primeras personas que tuvieron acceso a la nueva tecnología del tubo del vacío de Geissler. Llevó a cabo una serie de experimentos en los que investigó la naturaleza de la incandescencia que se veía en dichos tubos cuando una corriente eléctrica fluía entre los electrodos (ésta es esencialmente la tecnología de los tubos de neón), y fue uno de los discípulos de Plücker, Johann Hittorf (1824-1914), el primero en darse cuenta de que los rayos incandescentes emitidos desde el cátodo (electrodo negativo) en estos tubos parecían seguir trayectorias rectilíneas. En 1876, Eugen Goldstein (1850-1930), que entonces estaba trabajando con Hermann von Helmholtz en Berlín, dio a aquellas líneas incandescentes el nombre de «rayos catódicos». Demostró que estos rayos podían proyectar sombras y, como hicieron también varios de sus contemporáneos, comprobó que eran desviados por los campos magnéticos, pero pensó que eran ondas electromagnéticas similares a la luz. En 1886, Goldstein descubrió otro tipo de «rayos» que eran emitidos desde unos orificios existentes en los ánodos (electrodos positivos) de los tubos de descarga que estaba utilizando en aquel momento; los llamó «rayos canales», según la palabra alemana empleada para designar a dichos orificios. Actualmente sabemos que estos «rayos» son chorros de iones dotados de carga positiva, es decir, átomos que han perdido uno o más electrones.

Ya en 1871, en un informe publicado por la Royal Society, el ingeniero eléctrico Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883) sugería que los rayos catódicos podían ser «partículas de materia atenuadas, proyectadas por la electricidad desde el polo negativo»,[1] y esta idea de dar una explicación corpuscular para

los rayos fue luego retomada por William Crookes (1832-1919)
.

William Crookes: el tubo de Crookes y la interpretación corpuscular de los rayos catódicos

Crookes, que nació el 17 de junio de 1832 en Londres, fue el mayor de dieciséis hermanos, y su padre era sastre y hombre de negocios. Su carrera profesional como científico no fue nada habitual y se sabe poco sobre la primera fase de su educación, pero a finales de la década de 1840 era ayudante de August von Hoffmann en el Royal College of Chemistry. Trabajó en el Departamento de Meteorología del Radcliffe Observatory en Oxford en 1854 y 1855, y luego como profesor de química en el Chester Training College durante el año académico 1855-1856. Pero posteriormente heredó de su padre una cantidad de dinero que le bastaba para ser económicamente independiente y regresó a Londres, donde montó un laboratorio de química privado y fundó la publicación semanal *Chemical News*, que editó hasta 1906. Crookes tenía interés por muchas cosas (incluido el espiritismo), pero sólo hablaremos del papel que desempeñó en la historia del descubrimiento de los electrones. Esto fue consecuencia de su invención de un tubo de vacío mejor que los que existían hasta el momento (llamado tubo de Crookes), con el que se creaba un vacío aún mejor (más riguroso) que el que podían conseguir sus colegas contemporáneos de la zona continental europea. Con un vacío mejor, Crookes pudo realizar experimentos que, según él, aportaban una prueba definitiva de la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos. Una parte de esos experimentos consistía en colocar una cruz de Malta metálica en el tubo y obtener una sombra nítidamente perfilada de la cruz en la incandescencia producida cuando los rayos chocaban contra la pared del tubo de cristal situada detrás de la cruz.

También colocó una pequeñísima rueda de paletas en la trayectoria del haz de rayos catódicos, demostrando así que, dado que el impacto de los rayos hacía girar la rueda, los rayos tenían velocidad. En 1879 dio argumentos a favor de la interpretación crepuscular de los rayos catódicos y ésta pronto se convirtió en la interpretación admitida por la mayoría de los físicos británicos. Sin embargo, la situación era bastante diferente en el continente, especialmente en Alemania, donde a principios de la década de 1880 Heinrich Hertz realizó unos experimentos que parecían demostrar que los campos eléctricos no producían efecto alguno sobre estos rayos (sabemos actualmente que esto se debía a que sus tubos de vacío contenían demasiado gas residual, que se ionizaba e interfería con los electrones), y se estableció firmemente la idea de que los rayos catódicos eran un tipo de onda electromagnética. En parte porque el descubrimiento de los rayos X (de los cuales hablaremos más tarde con detalle) desvió la atención de los físicos, esta situación no se resolvió definitivamente hasta finales de la década de 1890.

Se demuestra que los rayos catódicos se mueven mucho más lentamente que la luz

Las pruebas de que los rayos catódicos no podían ser sencillamente un tipo de radiación electromagnética llegaron en 1894, cuando J. J. Thomson, en Inglaterra, demostró que se desplazaban mucho más lentamente que la luz (recordemos que las ecuaciones de Maxwell nos dicen que todas las radiaciones electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz). En 1897 eran cada vez más contundentes las pruebas de que los rayos catódicos transportaban carga eléctrica. Unos experimentos realizados en 1895 por Jean Perrin (del que estuvimos hablando en el capítulo 10) fueron, entre otros, los que demostraron que los rayos catódicos se desvían lateralmente por efec-

to de un campo magnético, del mismo modo que lo haría un haz de partículas dotadas de carga eléctrica. Además, Perrin había demostrado también que, cuando los rayos catódicos chocan contra una placa de metal, la placa adquiere carga negativa. En 1897 Perrin estaba trabajando en unos experimentos destinados a probar las propiedades que tenían las partículas de aquellos «rayos», cuando otros científicos se le adelantaron —Walter Kaufmann en Alemania y, de una manera decisiva, J. J. Thomson en Inglaterra—. Kaufmann, que trabajaba en Berlín, estaba estudiando el modo en que los rayos catódicos eran desviados por los campos eléctricos y magnéticos en tubos de vacío que contenían gases de distintos tipos y con diferentes presiones residuales. A partir de estos experimentos pudo deducir la proporción entre la carga de estas partículas y sus masas: *e/m*. Esperaba que esta proporción diese valores distintos según los gases utilizados, porque creía que estaba midiendo las propiedades de lo que actualmente llamamos iones, es decir, átomos que habían adquirido una carga por haber estado en contacto con el cátodo. Se sorprendió al ver que siempre obtenía el mismo valor para *e/m*. Thomson (que, por cierto, no tenía relación alguna con el William Thomson que llegó a ser lord Kelvin) también midió el valor de *e/m*, pero utilizando una técnica muy esmerada en la que un haz de rayos catódicos era desviado en una dirección por un campo magnético, y luego en sentido contrario por otro campo magnético, de tal modo que los dos efectos se compensaban con toda exactitud, anulándose mutuamente. Pero «no» se sorprendió al descubrir que siempre conseguía el mismo valor para esta proporción, porque pensó desde el principio que estaba manejando chorros de partículas idénticas emitidas por el cátodo. Expresó su resultado a la inversa, es decir como *m/e*, e indicó que el hecho de que de esta manera se obtuviera un valor tan pequeño para este número, comparado con el resultado equivalente que se obtenía para el

hidrógeno (lo que ahora sabemos que son los iones de hidrógeno, equivalentes a protones), significaba que la masa de la partícula en cuestión era muy pequeña, o bien que su carga era muy grande, o una combinación de ambas cosas. En una conferencia pronunciada en la Royal Institution el 30 de abril de 1897, Thomson comentó que «la suposición de que exista un estado de la materia más finamente dividido que el átomo es en cierto modo sorprendente».[2] Más tarde escribió lo siguiente: «Mucho después, un distinguido colega que había estado presente durante mi conferencia me dijo que pensaba que yo había estado *tomándoles el pelo*».[3]

El descubrimiento del electrón

A pesar de todo, 1897 se considera a menudo el año del «descubrimiento» del electrón. Pero el auténtico descubrimiento llegó dos años más tarde, en 1899, cuando Thomson consiguió medir la carga eléctrica en sí misma, utilizando una técnica consistente en cargar eléctricamente unas gotitas de agua y controlarlas mediante campos eléctricos. Fue esta medición de e la que le permitió obtener un valor real para m, demostrando que las partículas (a las que él llamó «corpúsculos») que forman los rayos catódicos tienen cada una de ellas solamente alrededor de dos milésimas de la masa de un átomo de hidrógeno y son «una parte de la masa del átomo que se libera y queda separada del átomo original».[4] En otras palabras, por muy asombroso que pueda ser el descubrimiento, definitivamente el átomo «no» era indivisible. Pero ¿quién fue el que se atrevió a dejar caer esta bomba?

Thomson nació en Cheetham Hill, cerca de Manchester, el 18 de diciembre de 1856. Fue bautizado como Joseph John, pero de adulto siempre fue conocido sencillamente por sus iniciales «J. J.». Cuando tenía 14 años de edad, comenzó a estudiar

ingeniería en el Owens College (la institución precursora de la Universidad de Manchester), pero su padre, un anticuario especializado en libros, falleció dos años más tarde y las consiguientes restricciones en la economía familiar hicieron que J. J. tuviera que cambiarse a un curso de física, química y matemáticas, para el que recibió una beca. En 1876 se trasladó al Trinity College de Cambridge (de nuevo con una beca) y obtuvo la licenciatura en matemáticas en 1880, quedándose luego definitivamente en Cambridge durante el resto de su vida, si exceptuamos unas breves visitas a Princeton. A partir de 1880 Thomson trabajó en el Cavendish Laboratory; sucedió a lord Rayleigh en la dirección de esta institución en 1884 (la universidad había querido nombrar a William Thomson pero éste prefirió quedarse en Glasgow) y ocupó el puesto hasta 1919, año en que dimitió, para ser director del Trinity College, siendo el primer científico que fue nombrado para este cargo, en el que permaneció hasta su muerte, acaecida el 30 de agosto de 1940. En 1906 recibió el Premio Nobel por su trabajo sobre los electrones y en 1908 le fue otorgado el título de *sir*.

El hecho de que Thomson, siendo matemático, optara por ser catedrático de física experimental y director del Cavendish Laboratory pudo ser una elección inspirada, o bien un golpe de suerte. Tenía una rara habilidad para idear experimentos que revelarían verdades fundamentales sobre el mundo físico (como el experimento para medir *e/m*), y también podía usar su destreza para señalar por qué los experimentos diseñados por otros no funcionaban como era de esperar —incluso cuando la persona que había preparado el experimento no podía ver qué era lo qué había ido mal—. Sin embargo, era notablemente torpe cuando se trataba de manejar aparatos delicados, hasta tal punto que, según se decía, sus colegas intentaban impedirle la entrada a los laboratorios en los que ellos estaban trabajando (a menos que necesitaran su punto de vista con respecto a los

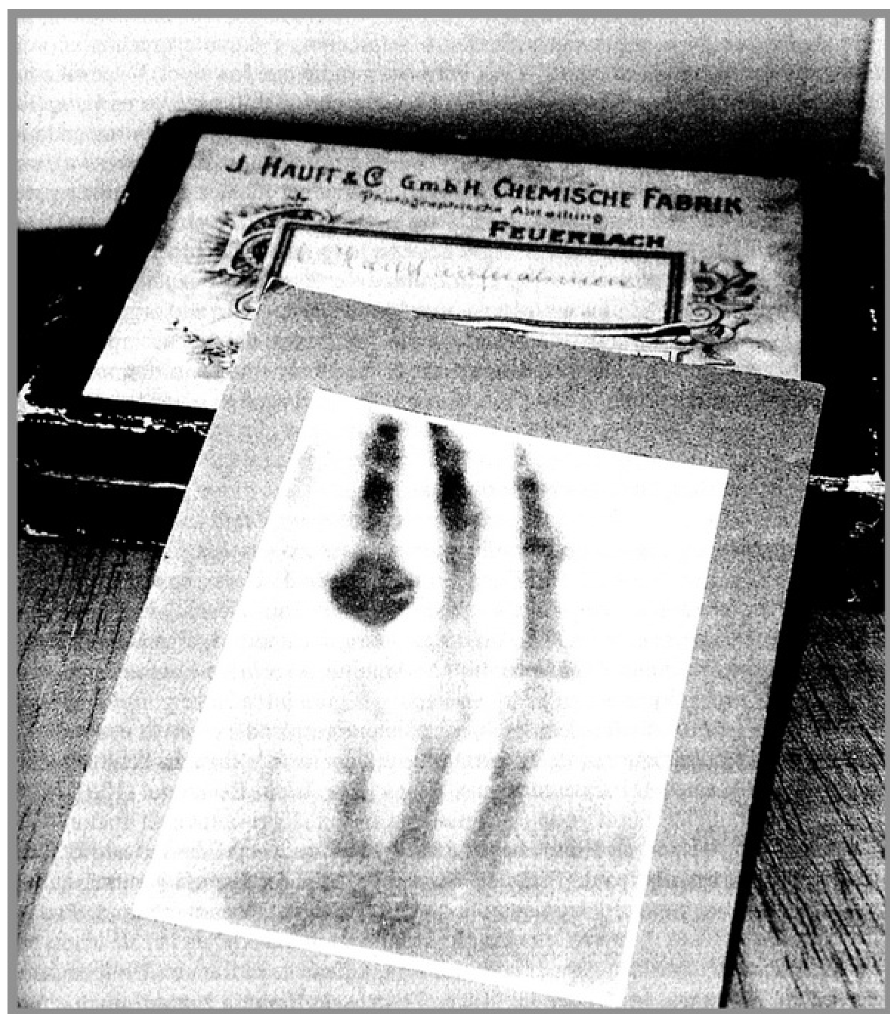
puntos débiles de algún experimento que se les resistía). Casi se podría decir que J. J. Thomson fue el último experimentalista teórico. El hecho de que siete de los físicos que trabajaron como ayudantes de Thomson recibieran premios Nobel nos da una medida de su habilidad y del modo en que el Cavendish Laboratory seducía a muchos de los mejores físicos para que fueran a trabajar a Cambridge a finales del siglo XIX y principios del XX. En todo este éxito, Thomson desempeñó un papel muy importante como maestro, guía y director (muy apreciado) de departamento.

Aunque el Cavendish Laboratory en ningún caso acaparaba el mercado después de un éxito de este tipo, como se demostró con los descubrimientos de los rayos X y de la radioactividad, el equipo de Thomson habitualmente se apresuraba a explotar las implicaciones de sus logros, incluso cuando éstos se habían conseguido en algún otro lugar. Generalmente, los autores de los grandes descubrimientos científicos han sido casi siempre jóvenes apresurados y llenos de ideas brillantes. Pero, a finales del siglo XIX, gracias al perfeccionamiento de la tecnología de los tubos de vacío, se abrieron nuevos y amplios caminos en la investigación científica, concretamente en la rama de la ciencia que llegó a conocerse como física atómica y que era en sí misma muy joven. En tales circunstancias, y habiendo un montón de descubrimientos que estaban literalmente dando vueltas a la espera de alguien que los realizase, la experiencia y el acceso a la nueva tecnología tenían tanto valor como la juventud y el entusiasmo. Por ejemplo, no se podría decir que Wilhelm Röntgen estuviera en la flor de su juventud cuando hizo el descubrimiento de los rayos X.

Wilhelm Röntgen y el descubrimiento de los rayos X

Röntgen nació en Lennep, Alemania, el 27 de marzo de 1845 y siguió una trayectoria convencional a través del sistema académico, llegando a ser catedrático de física de la Universidad de Würzburg en 1888. Era un físico coherente y con buena capacidad que trabajaba en distintas áreas dentro de la física, sin establecer ninguna distinción especial. Sin embargo, en noviembre de 1895, cuando tenía 50 años, Röntgen estaba estudiando el comportamiento de los rayos catódicos utilizando un diseño perfeccionado de tubo de vacío (los distintos diseños se denominaban según los nombres de los pioneros de la tecnología, como tubos de Hittorf o tubos de Crookes, pero los principios en que se basaban eran los mismos para todos ellos). En 1894, Philipp Lenard había demostrado, partiendo de los trabajos de Hertz, que los rayos catódicos podían atravesar finas hojas de metal sin dejar orificio alguno. En aquella época, esto se interpretó como una prueba de que estos «rayos» debían de ser ondas, ya que se suponía que las partículas debían dejar alguna huella de su paso (por supuesto, pensaban en términos de partículas cuyo tamaño fuera al menos igual al de los átomos). Partiendo de este descubrimiento, Röntgen trabajó con un tubo de vacío completamente recubierto con una fina cartulina negra. Su idea era bloquear el paso de la luz incandescente que se producía dentro del tubo con el fin de detectar el más leve rastro de rayos catódicos que pudiera penetra en el cristal del propio tubo. Uno de los modos habituales de detectar los rayos catódicos consistía en utilizar una pantalla de papel pintada con cianuro de platino y bario que se volvía fluorescente cuando los rayos impactaban sobre ella. El 8 de noviembre de 1895, Röntgen había dejado una pantalla de éstas a un lado del aparato, fuera de la línea de impacto de los rayos catódicos, ya que esta pantalla no tenía nada que ver con el experimento que estaba realizando. Para su sorpresa, observó que la pantalla adquiría un brillo fluorescente cuando el tubo de vacío estaba funcio-

nando con el laboratorio a oscuras. Después de llevar a cabo unas meticulosas investigaciones para asegurarse de que había descubierto realmente un fenómeno nuevo, Röntgen presentó un informe sobre este descubrimiento ante la Würzburg Physikalisch-Medizinische Gesellschaft «Sociedad Físico-Médica de Würzburg» el 28 de diciembre; dicho informe se publicó en enero de 1896. El descubrimiento de lo que el propio Röntgen llamó «rayos X», pero que en el mundo germanohablante se suele denominar «rayos Röntgen», causó sensación, en gran medida por la capacidad que tienen estos rayos para penetrar en el cuerpo humano y proporcionar imágenes fotográficas del esqueleto. Los primeros ejemplares del informe relativo al descubrimiento, en los que se incluían, entre otras cosas, fotografías por rayos X de una mano de la esposa de Röntgen, se difundieron el 1 de enero de 1896 y, al cabo de una semana, comenzaron a aparecer en los periódicos los primeros reportajes sobre este hallazgo sensacional. El 13 de enero, Röntgen realizó una demostración del fenómeno ante el emperador Guillermo II en Berlín, y se publicaban traducciones al inglés de este informe en la revista *Nature* el 23 de enero (el mismo día en que Röntgen daba su única conferencia pública sobre el tema en Würzburg) y también en *Science* el 14 de febrero. En marzo de 1896, Röntgen publicó otros dos informes sobre los rayos X, pero éstas fueron sus últimas contribuciones al tema, aunque siguió en activo dentro de la ciencia, llegando a ser catedrático de física en Munich en 1900. Murió el 10 de febrero de 1923. Su gran contribución a la ciencia le valió en 1901 el Premio Nobel de física, el primero que se concedió en esta rama de la ciencia.



35. Radiografía realizada por Röntgen en 1895 a la mano de su propia esposa, mostrando el anillo de boda.

Casi desde el principio, los físicos supieron gran cantidad de cosas sobre el comportamiento de los rayos X. Aunque no sabían exactamente qué eran estos rayos. Se producían cuando los rayos catódicos incidían sobre las paredes de cristal de un tubo de vacío (por lo tanto la procedencia de la energía que transportaban no era ningún misterio) y se extendían desde esta fuente en todas las direcciones. Se propagaban en línea recta, como la luz, afectaban al material fotográfico, y no eran desvia-

dos por los campos eléctricos ni por los campos magnéticos. Sin embargo, a diferencia de la luz, no parecía que experimentaran reflexión o refracción, y durante muchos años no estuvo claro si eran ondas o partículas. Esto no impidió que los rayos X se utilizaran ampliamente durante la década que siguió a su descubrimiento, no sólo en las aplicaciones médicas inmediatas (aunque con algunos desafortunados efectos secundarios por el desconocimiento de los peligros que conlleva una exposición excesiva), sino también en la física, donde, por ejemplo, demostraron ser ideales para ionizar gases. Hasta más o menos después del año 1910 no llegó a estar claro que los rayos X son en realidad un tipo de onda electromagnética con longitudes de onda mucho más cortas que la luz visible (o incluso que la luz ultravioleta), y que sí experimentan reflexión y refracción, cuando los anticátodos son los adecuados. Sin embargo, por lo que respecta al desarrollo de la física atómica, lo más importante del descubrimiento de los rayos X es que condujo, casi inmediatamente, al descubrimiento de otro tipo de radiación mucho más intrigante.

La radioactividad: Becquerel y los Curie

Si ha habido alguna vez un científico que haya estado en el lugar adecuado en el momento adecuado, ése fue Henri Becquerel. El abuelo de Henri, Antoine Becquerel (1788-1878), fue un pionero en el estudio de los fenómenos eléctricos y luminiscentes, con tanto éxito que en 1838 se fundó para él una cátedra de física en el Museo Francés de Historia Natural. El tercer hijo de Antoine, Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), trabajó junto a su padre en París y llegó a interesarse por el comportamiento de los sólidos fosforescentes —cristales que resplandecen en la oscuridad—. En 1878, cuando Antoine murió, Edmond (que era como se le llamaba habitualmente) le su-

cedió en la cátedra. Para entonces, su propio hijo, Henri Becquerel (1852-1908), seguía ya la tradición familiar de dedicarse a la física. Henri obtuvo su doctorado en la Facultad de Ciencias, en París, el año 1888. En 1891, cuando Edmond murió, Henri se convirtió en catedrático de física del Museo Francés de Historia Natural, aunque también trabajó al mismo tiempo como ingeniero jefe en el Departamento de Puentes y Carreteras en París. A su vez, cuando Henri falleció, le sucedió en la cátedra su propio hijo, Jean (1878-1953); y tuvo que suceder que Jean se retirara en 1948 sin haber tenido hijos, para que la cátedra del Museo Francés de Historia Natural fuera concedida, por primera vez desde su creación 110 años antes, a alguien que no fuera un Becquerel. En medio de esta dinastía se encontraba pues Henri Becquerel, quien el 20 de junio de 1896 estaba en una reunión en la Academia Francesa de las Ciencias, donde llegaron a sus oídos noticias de última hora sobre los rayos X, que hablaban, entre otras cosas, del descubrimiento de una zona brillante en las paredes de cristal de un tubo de rayos catódicos y de que esta zona brillante coincidía con el lugar donde los rayos chocaban con el cristal y lo ponían fluorescente. Esto le sugirió la idea de que los objetos fosforescentes, que también relucen en la oscuridad, podrían producir rayos X, e inmediatamente se puso a comprobar esta hipótesis utilizando la gran variedad de materiales fosforescentes que se habían acumulado en el museo desde la época de su abuelo.

La característica crucial de estos materiales fosforescentes era que debían ser expuestos a la luz solar para conseguir que resplandecieran. Esta exposición, por razones desconocidas, los cargaba de energía, de tal forma que después relucían en la oscuridad durante cierto tiempo, apagándose poco a poco a medida que la energía procedente de la luz solar se iba agotando. En su investigación sobre los rayos X, Becquerel envolvió cuidadosamente unas placas fotográficas en dos hojas de grueso

papel negro, de tal forma que la luz no pudiera penetrar, y colocó cada una de estas placas envueltas bajo una cubeta donde había sales fosforescentes que habían sido «cargadas» previamente mediante su exposición a la luz solar. Es bastante seguro que, tras desenvolver y revelar estas placas, en el caso de algunas de estas sales descubriría que las placas presentaban un esbozo del material fosforescente —y si un objeto de metal, como por ejemplo una moneda, había sido colocado entre la cubeta de sales fosforescentes y las placas envueltas, entonces, al hacer el revelado de las placas, éstas mostraban la silueta del objeto de metal—. Parecía ser que los rayos X podían ser producidos por la acción de la luz solar sobre las sales fosforescentes, así como por la acción de los rayos catódicos sobre un cristal, y sobre estos resultados se informó debidamente a la comunidad científica.

Sin embargo, a finales de febrero de 1896, Becquerel preparó otro experimento. Colocó una pieza de cobre con forma de cruz entre las placas fotográficas envueltas y la cubeta de las sales fosforescentes (un compuesto de uranio) y esperó a que saliera el sol. El cielo de París estuvo encapotado durante varios días y, el 1 de marzo, cansado de esperar, Becquerel decidió que, de todas formas, haría el revelado de las placas (no está claro si la idea de realizar este experimento de control fue un capricho o una decisión deliberada). Para su sorpresa, descubrió que se había formado la silueta de la cruz de cobre. Aunque las sales fosforescentes no daban resplandor alguno, e incluso a pesar de que no se habían cargado mediante la luz solar, al menos en el caso de los compuestos de uranio habían producido lo que parecía ser rayos X.[5] El aspecto más impactante de este descubrimiento fue constatar que, aparentemente, las sales producían energía a partir de nada, cosa que parecía contradecir uno de los dogmas más sagrados de la física: la ley de la conservación de la energía.

Este descubrimiento no produjo el impacto generalizado que había tenido el descubrimiento de los rayos X, porque fuera del círculo de expertos científicos (e incluso para muchos científicos) parecía como si se tratara solamente de otra versión de los rayos X. El propio Becquerel no tardó en dejar el asunto y dedicarse a otro tema, aunque previamente realizó algunos estudios sobre las propiedades de la radiación que había descubierto y demostró en 1899 que dicha radiación podía ser desviada por un campo magnético, por lo que no podía ser una radiación de rayos X, sino de algo que estuviera formado por partículas cargadas. Pero los que se hicieron cargo de realizar una investigación detallada de este fenómeno fueron, en París, Marie y Pierre Curie (con quienes Becquerel compartió el Premio Nobel en 1903), y Ernest Rutherford (de quien hablaremos más adelante), que comenzó las investigaciones inicialmente en el Cavendish Laboratory.

Es el nombre de Marie Curie el que en la opinión pública aparece más estrechamente vinculado con las primeras investigaciones sobre radioactividad (un término que ella acuñó). Esto se debe en parte a que su papel fue realmente importante, y en parte a que era una mujer y aportó uno de los pocos modelos de participación femenina en la ciencia, lo cual garantizaba que la prensa se ocuparía del asunto, aunque también las difíciles condiciones en que tuvo que trabajar proporcionan un elemento novelesco a la historia. Parece ser que todo esto impresionó al comité para la concesión del Premio Nobel, ya que concedió a Marie Curie dos veces este premio prácticamente por el mismo trabajo el Premio Nobel de física en 1903 y el de química en 1911—. Nacida en Varsovia el 7 de noviembre de 1867, su nombre fue inicialmente Marya Sklodowska y no tenía ninguna posibilidad de asistir a una universidad en lo que entonces era la zona rusa de una Polonia dividida. Tuvo grandes dificultades para reunir los fondos que le permitieron trasladarse a

París en 1891 para estudiar en la Sorbona. Mientras estaba estudiando para conseguir la licenciatura, se puede decir que literalmente se moría de hambre en una buhardilla. Fue en la Sorbona donde conoció al que en 1895 se convertiría en su marido, Pierre Curie, hijo de un médico, que había nacido el 15 de mayo de 1859 y, cuando Marie le conoció, estaba establecido y tenía ya una excelente reputación como experto en las propiedades de los materiales magnéticos. Poco después de contraer matrimonio, Marie se quedó embarazada y, en consecuencia, hasta septiembre de 1897 no pudo dedicarse a su tesis doctoral sobre la «radiación del uranio». En aquella época, ninguna mujer había obtenido jamás un doctorado en ninguna universidad europea, aunque Elsa Neumann, en Alemania, pronto lo obtendría. Siendo mujer pionera en el mundo científico, se le permitió bastante a regañadientes el uso de un cobertizo con goteras para que desarrollara allí su trabajo no se le consintió el acceso a los laboratorios principales por temor a que la excitación sexual que podría producir su presencia obstaculizara las tareas de los investigadores.

Marie hizo su primer gran descubrimiento en febrero de 1898 que la pechblenda (el mineral del que se extrae el uranio) es «más» radioactiva que el propio uranio, por lo que ha de contener otro elemento altamente radioactivo. El descubrimiento fue tan importante que Pierre abandonó las investigaciones que estaba realizando y unió sus esfuerzos a los de Marie para aislar este elemento, que hasta entonces era desconocido; después de un intenso trabajo descubrieron en realidad dos elementos, uno al que llamaron «polonio» (un gesto abiertamente político con respecto a su país, que oficialmente no existía) y otro que denominaron «radio». En marzo de 1902 consiguieron finalmente aislar un decigramo de radio a partir de toneladas de pechblenda, una cantidad suficiente para poder analizarlo químicamente y encontrar su lugar en la tabla periódica.

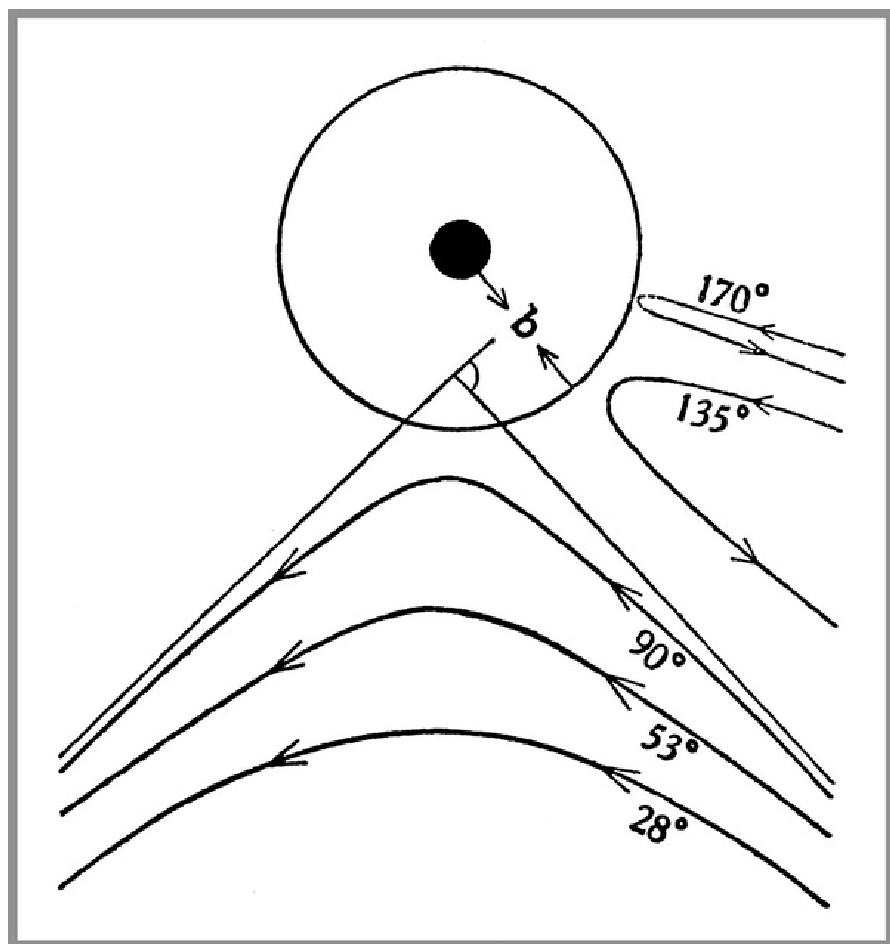
Marie obtuvo su doctorado un año más tarde —el mismo año en que recibió su primer Premio Nobel—. Fue Pierre quien midió la asombrosa cantidad de energía que producía el radio —suficiente para que cada gramo de radio calentara un gramo y un tercio de agua desde el punto de congelación hasta el punto de ebullición en una hora—. Además, esta actividad parecía no tener fin, ya que un solo gramo de radio era capaz de calentar una y otra vez un gramo y otro de agua de la misma manera hasta el punto de ebullición —era como obtener algo a partir de nada, en una violación flagrante de la ley de conservación de la energía—. Este descubrimiento fue tan importante como el descubrimiento del radio en sí mismo e hizo que el equipo obtuviera un reconocimiento cada vez mayor. Sin embargo, justo cuando la pareja Curie comenzaba a disfrutar una vida más confortable como resultado de su éxito, el 19 de abril de 1906 Pierre murió al resbalar cruzando una calle en París, ya que tuvo la mala suerte de que las ruedas de un coche de caballos le aplastaran el cráneo. Parece altamente probable que el resbalón fuera consecuencia de los ataques de vértigo que padecía, ocasionados por lo que actualmente se considera que fue una enfermedad debida a la radiación. Marie murió en una clínica de la Alta Saboya el 4 de julio de 1934 a causa de la leucemia, siendo finalmente víctima también de una enfermedad producida por la radiación. Sus cuadernos de laboratorio son todavía tan radioactivos que se conservan en un baúl forrado de plomo, y sólo se sacan de allí ocasionalmente y con grandes medidas de precaución.

Los descubrimientos de los rayos X y de la radiación «atómica», e incluso la identificación del electrón, constituyen sólo una primera fase de descubrimientos dentro de todo el desarrollo del conocimiento del mundo subatómico en realidad, fueron el descubrimiento de que existía un mundo subatómico que había que explorar—. El científico que, más que ningún

otro, dio forma al mundo subatómico poniendo un cierto orden en estos descubrimientos y deduciendo la primera explicación de la estructura del átomo fue Ernest Rutherford. Rutherford había nacido el 30 de agosto de 1871 en una comunidad rural de la Isla del Sur de Nueva Zelanda. En aquella época había poco más que comunidades rurales en Nueva Zelanda, que no fue reclamada como territorio propio por Gran Bretaña hasta mayo de 1840, en gran medida para evitar que Francia estableciera allí una colonia. Los padres de Rutherford habían llegado ambos a Nueva Zelanda siendo niños, junto con sus padres (escoceses por la línea paterna e ingleses por parte de su madre), formando parte de la primera oleada de colonos. Como sucedía a menudo en las comunidades de pioneros, las familias solían ser numerosas; Ernest (cuyo nombre fue registrado en realidad como Earnest, por un error en el registro de la iglesia, aunque él nunca lo utilizó con esta ortografía) formaba parte de una serie de doce hermanos, y tenía cuatro tíos de la familia de su madre y tres tías por el lado paterno. Nació en el municipio de Spring Grove, cerca de la ciudad de Nelson, pero a causa de los cambios en las delimitaciones municipales su lugar de nacimiento se encuentra actualmente en el municipio de Brightwater. La familia se trasladó a otro lugar situado a unos pocos kilómetros de distancia, llamado Foxhill, cuando Ernest tenía cinco años y medio.

Rutherford fue de niño un estudiante capaz, pero no destacado, que, según parece, a fuerza de trabajar duro llegaba justo a rendir lo suficiente para conseguir por los pelos las becas que le permitirían pasar al nivel educativo siguiente. De esta manera, obtuvo el título de graduado en letras que concedía el Canterbury College, Christchurch, en 1892 (en el programa había asignaturas tanto de ciencias como de letras), para luego conseguir en 1893 una licenciatura, basada en parte en una original investigación relacionada con la electricidad y el magnetismo

(aquel año solamente catorce estudiantes obtuvieron en Nueva Zelanda el título de licenciado). En aquella época Rutherford era ya brillante académicamente, pero incluso así le resultó imposible conseguir un trabajo como maestro (su primera opción) y prácticamente había agotado las posibilidades de estudio existentes en Nueva Zelanda. Se trazó un plan para continuar sus estudios en Europa con una beca; sin embargo, para poder solicitar aquella financiación, tenía que ser un estudiante matriculado en la universidad, por lo que en 1894 se inscribió en un curso de graduado en ciencias que le resultaba más bien superfluo y continuó trabajando en la investigación mientras se ganaba el sustento en un principio como preceptor (y probablemente con alguna ayuda económica de su familia). Por suerte para Rutherford, un profesor de la Christchurch Boy's High School cayó enfermo en noviembre de 1894 y Rutherford pudo asumir parte de su trabajo.



36. Diagrama de Rutherford en el que se muestra cómo se desvían las partículas alfa cuando pasan cerca de un núcleo pesado. (Rutherford, *A Newer Alchemy*, 1937).

La beca a la que Rutherford aspiraba formaba parte de un programa británico establecido en 1851 para celebrar la Exposición Universal. Esta beca proporcionaba una financiación para dos años (con una modesta dotación de 150 libras esterlinas anuales) para que estudiantes de investigación procedentes de Gran Bretaña, Irlanda, Canadá, Australia y Nueva Zelanda pudieran estudiar en cualquier lugar del mundo, pero el número de becas estaba estrictamente limitado y no se ofrecían todos los años a cualquier país. En 1895 sólo se ofreció una beca para

Nueva Zelanda y se presentaron dos candidatos, que tenían que competir entre sí en Londres realizando una disertaron en la que debían explicar en qué consistían sus proyectos de investigación. Ganó James Maelaurin, un químico de Auckland. Pero Maclaurin había conseguido un empleo en Auckland y acababa de casarse recientemente. Cuando llegó el momento de tomar la decisión, alegó que no podía aceptar la oferta. Así fue como Rutherford recibió la beca y en el otoño de 1895 se incorporó al Cavendish Laboratory, siendo la primera persona que entraba en la Universidad de Cambridge como estudiante de investigación hasta entonces el único modo de convertirse en miembro de aquella comunidad tan exclusiva era comenzar como estudiante de licenciatura y abrirse camino para ir ascendiendo —. Esto sucedió sólo dos meses antes de que Röntgen descubriera los rayos X y un par de años antes de que Thomson midiera el valor de *e/m* para el electrón. Rutherford fue entonces el hombre adecuado que estaba en el lugar adecuado en el momento adecuado «y además» era un joven que tenía prisa; la combinación de todo esto le llevaría a un éxito espectacular en el mundo de la ciencia.

Tas primeras investigaciones que Rutherford había realizado en Nueva Zelanda había tenido como objeto, entre otras cosas, las propiedades magnéticas del hierro, que demostró utilizando ondas de radio de alta frecuencia (sólo seis años después de que Hertz hubiera descubierto las ondas de radio). Como parte de este trabajo, Rutherford construyó un detector de ondas de radio, que resultó ser un aparato muy sensible para la época — uno de los primeros receptores de radio—. Su investigación continuó inicialmente una línea similar en Cambridge, donde realizó experimentos de transmisiones de radio a larga distancia (en realidad, algo menos de cuatro kilómetros), aproximadamente al mismo tiempo que Guglielmo Marconi hacía experimentos similares en Italia —aunque ha habido varias recla-

maciones de prioridad, es imposible actualmente decidir quién fue en realidad el primero que consiguió transmitir a estas distancias. Mientras Rutherford estaba interesado en los aspectos científicos de esta investigación y pronto se desvió hacia la emocionante investigación de la física subatómica, Marconi estaba pensando desde un principio en las posibilidades de la telegrafía sin hilos, con los resultados que ya conocemos todos.

DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS ALFA, BETA Y GAMMA

En la primavera de 1896, Rutherford estaba trabajando sobre el tema de los rayos X, bajo la supervisión de Thomson. El trabajo conjunto de ambos científicos incluía una investigación sobre el modo en que los rayos X ionizaban los gases y demostraron con pruebas muy consistentes que estos rayos eran una forma más energética de luz (es decir, con longitud de onda más corta), y por lo tanto unas ondas electromagnéticas a las que eran aplicables las ecuaciones de Maxwell (así se conectaba, en una relación retrospectiva, con el trabajo de Rutherford sobre ondas electromagnéticas en la banda de frecuencias de las ondas de radio, más allá del extremo de longitudes de onda largas del espectro visible). Rutherford no tardó en ponerse a investigar la radiación descubierta por Becquerel, y descubrió que estaba formada por dos componentes: una (a la que llamó «radiación alfa») que tenía corto alcance y se detenía al chocar con una hoja de papel o tras recorrer unos pocos centímetros en el aire, y la otra (a la que llamó «radiación beta») que tenía un alcance mucho más largo y un poder de penetración mucho mayor. Mientras estaba trabajando en Canadá en 1900, Rutherford identificó un tercer tipo de radiación, a la que llamó «radiación gamma».[6] Actualmente sabemos que los rayos alfa son chorros de partículas, siendo cada una de ellas esencialmente lo mismo que un átomo de helio al que le faltan dos electrones (al-

go que Rutherford comprobó en 1908). También sabemos que los rayos beta son chorros de electrones de alta energía (electrones que se mueven muy rápido), es decir, como los rayos catódicos, pero más energéticos. Con respecto a los rayos gamma, se trata de una forma energética de radiación electromagnética con longitudes de onda aún más cortas que las de los rayos X.

El viaje de Rutherford a Canadá fue en gran medida la consecuencia de una peculiaridad que existía en las reglas a las que estaban sujetos los estudiantes de investigación. La beca que le habían concedido en 1851 le subvencionaba sólo durante dos años, pero las reglas de Cambridge decían que, independientemente de los méritos, sólo era posible solicitar ser miembro de la universidad después de permanecer allí cuatro años (una reliquia de la época en que todos los que se integraban en el sistema de Cambridge entraban por la vía de ser un estudiante de licenciatura). Aunque Rutherford recibió financiación mediante otra beca para un año más, estaba más o menos obligado a marcharse en 1898 (las reglas para ser miembro cambiaron al año siguiente). Afortunadamente, quedó vacante una cátedra en la McGill University de Montreal y Rutherford consiguió el puesto. Tenía 27 años cuando recibió el nombramiento y, aunque había realizado investigaciones de alto nivel en Cambridge, no tenía el doctorado, que en aquellos tiempos no era esencial para hacer una carrera académica en el dominio de las ciencias.[7] Fue en Montreal, trabajando con un inglés de origen, Frederick Soddy (1877-1956), donde Rutherford descubrió que durante el proceso que libera la radiación descubierta por Becquerel (conocida actualmente como desintegración radioactiva), un átomo de un elemento se convierte en un átomo de otro elemento diferente. Cuando un átomo emite partículas alfa o beta (dicho con más rigor y adelantándonos sólo un poco a la cronología, el emisor sería el núcleo del átomo), lo que queda es un tipo de átomo diferente. La colaboración entre Rutherford y

Soddy resolvió también el misterio de la reserva inagotable de energía que parecía tener los materiales radioactivos, como el radio. Descubrieron que esta transformación de los átomos cumple una regla muy clara, según la cual una cierta proporción de los átomos que inicialmente están presentes en la muestra se desintegrarán en un cierto tiempo. En la mayoría de los casos esto se expresa denominándolo período de desintegración. En el radio, por ejemplo, unas mediciones precisas de la velocidad a la que la radiación disminuye en el laboratorio indican que si este elemento emite partículas alfa durante 1602 años, la mitad de los átomos se habrá desintegrado convirtiéndose en átomos de un gas llamado radón. Durante los 1602 años siguientes, se desintegrará la mitad de los átomos que quedan (un cuarto de la muestra original), y así sucesivamente. Esto significa dos cosas. En primer lugar, el radio que se encuentra en la tierra actualmente no puede haber estado aquí desde que se formó el planeta, sino que ha tenido que ser producido más o menos *in situ* (hoy en día lo sabemos por la desintegración del uranio radioactivo, que tiene una vida mucho más larga); en segundo lugar, la reserva de energía que contienen el radio y otros elementos radioactivos no es en absoluto inagotable. Incluso un calentador de agua que funcione a partir de la energía procedente del radio se quedará finalmente sin energía utilizable, ya que el radio constituye una reserva finita de energía (de la misma manera que un campo petrolífero constituye una reserva finita de energía), y desde luego no se viola la ley de la conservación de la energía. Fue Rutherford quien indicó que esta reserva de energía proporcionaba a la Tierra la posibilidad de tener un tiempo de vida de al menos cientos de millones de años, lo que inspiró directamente la obra de Bertram Boltwood (que oyó a Rutherford hablar del tema durante una conferencia sobre radioactividad que éste pronun-

ció en Yale) y preparó el camino para los trabajos de Arthur Holmes, al que ya mencionamos en el capítulo 12.

Aunque en Canadá fue feliz y tuvo un gran éxito, Rutherford se sentía preocupado por haberse alejado de la corriente principal en la que se desarrollaba la investigación en física que se estaba realizando en Europa. Por este motivo, rechazó una oferta lucrativa que le hicieron desde Yate y regresó a Inglaterra en 1907, para trabajar como catedrático de física en la Universidad de Manchester, donde había unas excelentes instalaciones para la investigación. Un indicio de la rapidez con que la física estaba avanzando en aquella época es el hecho de que en el plazo de un año el equipo de Rutherford ya había averiguado que las partículas alfa son lo mismo que unos átomos de helio que han perdido dos unidades de carga eléctrica negativa (porque, como sabemos actualmente, han perdido dos electrones). Un año después de esto, en 1909, las partículas alfa, producidas por la radioactividad natural, se estaban ya utilizando para comprobar la estructura del átomo.[8] Este es probablemente el trabajo por el que Rutherford se hizo más famoso, aunque en realidad los experimentos fueron realizados por Hans Geiger (1882-1945) y por un estudiante llamado Ernest Marsden (1889-1970), bajo la dirección de Rutherford. No es casualidad que posteriormente Hans Geiger desarrollara el detector de radiaciones que lleva su nombre (contador Geiger), ya que, por supuesto, estos experimentos no se podían realizar si no era posible detectar las partículas alfa en distintos lugares, después de que hubieran tenido su interacción con los átomos —en los experimentos clásicos llevados a cabo por Geiger y Marsden se trataba de unos átomos que estaban en una fina hoja de oro hacia la cual se dirigían las partículas alfa.

EL MODELO ATÓMICO DE RUTHERFORD

Antes de que se llevaran a cabo estos experimentos, el modelo de átomo que tenía más aceptación era probablemente el que había desarrollado J. J. Thomson, en el que el átomo se veía como algo parecido a una sandía —una esfera de materia cargada positivamente en la que estaban incrustados los electrones con su carga negativa, como las pepitas de la sandía—. Pero, cuando las partículas alfa, de carga positiva, se disparaban contra la fina hoja de oro, la mayoría la atravesaba directamente, algunas eran desviadas ligeramente hacia un lado, y unas pocas rebotaban hacia atrás, como una pelota de tenis cuando choca contra un muro de ladrillo. El hecho de que las partículas alfa llevaran dos unidades de carga positiva podía suponer que, ocasionalmente, fueran repelidas al acercarse a otras concentraciones de masa cargadas también positivamente. Fue Rutherford quien interpretó estos resultados considerándolos una clara señal de que la mayor parte de la masa y la carga del átomo estaba concentrada en un núcleo central diminuto, rodeado por una nube de electrones. La mayoría de las partículas alfa nunca entran en contacto con el núcleo central (un nombre acuñado, en este contexto, por el propio Rutherford en 1912, un año después de que los resultados de Geiger y Marsden fueran anunciados oficialmente), sino que se abren paso directamente a través de la nube de electrones. Una sola partícula alfa tiene un peso que es 8000 veces el de un electrón, por lo que los electrones no tienen ni la más remota esperanza de desviar a las partículas alfa. Si una partícula alfa llega a pasar cerca del núcleo de un átomo (que en el caso del oro pesa 49 veces más que una partícula alfa), la carga positiva del núcleo da un empujón a la partícula, desviándola hacia un lado. Sólo en raras ocasiones sucede que la partícula se dirija directamente hacia el núcleo, en cuyo caso es repelida y sale por donde ha venido.

Otros experimentos posteriores demostraron que el núcleo ocupa sólo alrededor de una cienmilésima del diámetro de un

átomo; normalmente, un núcleo de 10^{-13} centímetros de diámetro está empotrado dentro de una nube de electrones de 10^{-8} centímetros de diámetro. Hablando en términos muy aproximativos, las desproporciones son como la de un grano de arena con respecto al Carnegie Hall. Los átomos están formados en su mayoría por espacio vacío, ocupado todo él por una red de fuerzas electromagnéticas que actúan entre las cargas positivas y las negativas. Esto significa (lo cual seguramente habría encantado a Faraday) que todo lo que consideramos materia sólida, incluido el libro que está usted leyendo y la silla en la que se sienta, es en su mayor parte espacio vacío, ocupado completamente por una red de fuerzas electromagnéticas que actúan entre las cargas positivas y las negativas.

La desintegración radioactiva

Rutherford tenía todavía por delante una brillante carrera, pero nada de lo que consiguiese sería tan importante como su modelo atómico, por el que con toda seguridad tendría que haber recibido un segundo Premio Nobel, esta vez el de física. Durante la primera guerra mundial, trabajó desarrollando técnicas de detección de submarinos en las que se utilizaba el sonido (incluido el precursor de lo que sería el Asdic y el Sonar), y en 1919 sucedió a Thomson como profesor y director del Cavendish Laboratory. El mismo año, continuando la línea de experimentos anteriores realizados por Marsden, descubrió que los átomos de nitrógeno bombardeados con partículas alfa se convertían en una forma del oxígeno, con la emisión de un núcleo de hidrógeno (un protón: Rutherford acuñó también este término, que apareció por primera vez en una obra impresa en 1920). Esta fue la primera transmutación artificial de un elemento. Estaba claro que este proceso conllevaba un cambio en el núcleo del átomo, y marcó el comienzo de la física nuclear.

Mediante experimentos realizados conjuntamente con James Chadwick (1891-1974) entre 1920 y 1924, Rutherford demostró que la mayoría de los elementos más ligeros emitían protones cuando eran bombardeados con partículas alfa. Desde entonces hasta su temprana muerte (el 19 de octubre de 1937, por complicaciones resultantes de un problema de hernia que tuvo durante muchos años) el papel que desempeñó fue principalmente el de ejercer una gran influencia como guía de una nueva generación de físicos en el Cavendish Laboratory; había sido nombrado *sir* en 1914 y se convirtió en barón Rutherford of Nelson en 1931, sólo un año antes de que quedara finalizado el modelo nuclear del átomo gracias al descubrimiento (o identificación) de los neutrones, realizado por Chadwick.

La existencia de los isótopos

Entre 1912, año en que Rutherford dio nombre al núcleo del átomo, y 1932, cuando Chadwick identificó los neutrones, aparte del descubrimiento de que los núcleos de un elemento pueden transformarse en núcleos de otro elemento, el acontecimiento más importante para el conocimiento del átomo fue el descubrimiento de que cada elemento puede presentarse en variedades diferentes. El autor de este descubrimiento fue Francis Aston (1877-1945), que lo hizo cuando estaba trabajando junto con Thomson en el Cavendish Laboratory a finales de la segunda década del siglo XX. Frederick Soddy, que entonces trabajaba en la Universidad de Glasgow, había sugerido en 1911 que algunos aspectos misteriosos del comportamiento químico podrían entenderse si los elementos se presentasen en variedades diferentes, que tuvieran propiedades químicas idénticas, pero pesos atómicos diferentes. En 1913 dio a estas variedades el nombre de «isótopos» (entre otras cosas, como ya hemos dicho, la existencia de isótopos explica algunas de las reor-

denaciones que Mendeleiev tuvo que hacer en la tabla periódica). La prueba de la existencia de los isótopos surgió a partir de los trabajos de Aston, en los que se realizó el control del modo en que los «rayos» o radiaciones de carga positiva producidos en tubos de descarga (en realidad iones, es decir, átomos privados de algunos de sus electrones) son desviados por los campos eléctricos y magnéticos. Se trataba de una aplicación de la técnica utilizada por Thomson para medir el valor de *e/m* en el caso del electrón; Aston estaba midiendo el valor de *e/m* en los iones y, dado que e era un valor conocido, eso significaba que podía calcular su masa. Con la misma carga eléctrica, las partículas que se mueven a la misma velocidad en el mismo campo eléctrico, cuanto más pesen experimentaran una desviación lateral menor por cada metro que avancen, y cuanto menos pesen serán desviadas más. Esta es la base de lo que se conoce como espectrógrafo de masas, un aparato que Aston utilizó para demostrar que elementos como el oxígeno se presentan en realidad en distintas variedades, con átomos de masa diferente. Un átomo de la forma más común de oxígeno, por ejemplo, tiene una masa que es igual a 16 veces la masa de un átomo de hidrógeno; pero los átomos de oxígeno producidos cuando Rutherford bombardeó nitrógeno con partículas alfa tenían una masa igual a 17 veces la del átomo de hidrógeno. La razón por la que esto era así no se conoció hasta que Chadwick realizó sus trabajos durante la década de 1930, aunque los hallazgos de Aston tuvieron en sí mismos la importancia suficiente para que en 1922 se le concediera el Premio Nobel de química (Soddy había recibido el mismo premio en 1921). En 1900, como ya hemos visto, existía aún una oposición considerable frente a la idea de los átomos como entidades físicas reales; en la primera década del siglo XX, incluso las pruebas irrefutables presentadas por Einstein a favor de la existencia de los átomos se basaban en datos estadísticos referidos a grandes números de estas par-

tículas. Sin embargo, en 1920, los experimentos en los que se manejaban unos pocos átomos (acercándose mucho al nivel de átomos individuales) estaban llegando a ser una rutina.

El descubrimiento del neutrón

El trabajo por el que Chadwick recibió su propio Premio Nobel de física en 1935 se llevó a cabo en 1932, como continuación de los descubrimientos realizados por Walter Bothe (1891-1957) en Alemania y por los Joliot-Curie, Frédéric (1900-1958) e Irène (1897-1956), en Francia.[9] Bothe había descubierto en 1930 que el berilio expuesto a las partículas alfa producía una nueva forma de radiación, que intentó explicar hablando de rayos gamma. Los Joliot-Curie dieron un paso más allá. A finales de enero de 1932, informaron de que habían descubierto que, cuando el berilio era bombardeado mediante partículas alfa, los átomos bombardeados (en realidad, sus núcleos, como ellos mismos pudieron comprobar) emitían cierto tipo de radiación desprovista de carga eléctrica, que era difícil de detectar. Esta radiación, a su vez, hacía que unos protones, que son fáciles de detectar, fueran emitidos por la parafina (por los núcleos de los átomos contenidos en la parafina). También pensaron que esta radioactividad artificial inducida en el berilio era una forma intensa de radiación gamma, pero Chadwick constató que lo que estaba sucediendo era que la radiación alfa estaba empujando a unas partículas neutras a salir fuera de los núcleos del berilio, y que aquellas partículas neutras estaban a su vez empujando a unos protones (núcleos de hidrógeno) a salir de la parafina, que contiene muchos átomos de hidrógeno. En experimentos posteriores, en los que los objetivos bombardeados eran átomos de boro, Chadwick confirmó la existencia de esta partícula neutra y calculó su masa, que es ligeramente mayor que la del protón.

No deja de ser paradójico que Chadwick llevara a cabo su obra más importante a lo largo de unos pocos días de trabajo frenético en febrero de 1932, estimulado por el anuncio que los Joliot-Curie habían hecho en París. Durante toda la década de 1920, el equipo del Cavendish Laboratory, y en particular Chadwick, había estado buscando, una y otra vez, una entidad neutra formada por un protón y un neutrón firmemente unidos, que parecía ser necesaria para explicar cómo podían existir, en general, las partículas alfa y los núcleos (se pensaba entonces que las partículas alfa estaban formadas por cuatro protones unidos con dos electrones). Rutherford había llegado incluso a utilizar la palabra *neutrón*, probablemente ya en 1920, para referirse a esa unión de un protón y un electrón, aunque la primera vez que apareció dicha palabra impresa en una publicación fue en 1921.[10] Esto explica por qué Chadwick, cuando recibió las noticias de París, se puso en movimiento con tanta rapidez para llegar a lo que ahora sabemos que es la conclusión correcta. Con el descubrimiento del neutrón, todos los componentes del átomo que hemos estudiado en la escuela se habían identificado ya, sólo unos setenta años antes de la publicación de este libro. Sin embargo, con el fin de averiguar cómo están ensambladas las distintas partes del átomo y, en particular, por qué una nube de electrones con cargas negativas no cae sobre el núcleo, que tiene carga positiva, hemos de remontarnos una vez más a finales del siglo XIX y a otro misterio relativo a la naturaleza de la luz.

Dicho misterio se refería a la naturaleza de la radiación electromagnética emitida por un irradiador ideal perfecto: un cuerpo negro. Un cuerpo negro perfecto es un cuerpo ideal que absorbe todas las radiaciones que le llegan y, cuando un objeto así está caliente, emite una radiación de una manera que es totalmente independiente de la materia de que esté hecho el objeto, dependiendo sólo de su temperatura. Si tenemos un reci-

piente sellado, pero que tiene un pequeño orificio, ese orificio actúa como un cuerpo negro; cuando calentamos el recipiente, la radiación se agita recorriendo todo su interior y se mezcla perfectamente antes de escapar por el orificio en la forma de una radiación de un cuerpo negro. Esto proporcionó a los físicos una herramienta para estudiar tal radiación y, al mismo tiempo, otro nombre para denominarla: «radiación de una cavidad». Sin embargo, muchos objetos, como por ejemplo un trozo de hierro, se comportan aproximadamente como un cuerpo negro cuando son calentados e irradian energía. A finales de la década de 1850, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) describió y estudió la radiación de los cuerpos negros, pero durante las décadas siguientes, aunque muchos investigadores lo intentaron, se comprobó que era difícil encontrar un modelo matemático que describiera con precisión el espectro de aquella radiación emitida por un cuerpo negro que se ponía de manifiesto en los experimentos. Aunque no sería apropiado entrar en detalles en este libro, las características cruciales de este espectro de los cuerpos negros son que tiene un pico en una cierta banda de longitudes de onda, con menos energía emitida, tanto a longitudes de onda más cortas como a longitudes de onda más largas, y que la posición de este pico en el espectro electromagnético se desplaza hacia longitudes de onda más cortas cuando aumenta la temperatura del cuerpo negro. Así, por ejemplo, el hecho de que un trozo de hierro calentado al rojo vivo esté menos caliente que uno cuya incandescencia es de color amarillo está relacionado con el hecho de que el hierro emite radiaciones más o menos como un cuerpo negro. Esta relación entre el color y la temperatura es vital en la astronomía, donde se utiliza para medir la temperatura de las estrellas.

Max Planck y la constante de Planck, la radiación de los cuerpos negros y la existencia de los cuantos de energía

Uno de los físicos que lucharon por encontrar un modelo matemático para la radiación de los cuerpos negros fue Max Planck (1858-1947), que llegó a ser catedrático de física teórica de la Universidad de Berlín en 1892. Su formación inicial se situaba en el dominio de la termodinámica, y desde 1895 en adelante estuvo intentando encontrar un modo de deducir la ley de la radiación de los cuerpos negros refiriéndola a la entropía de una serie de osciladores electromagnéticos (recordemos que en aquella época el electrón no había sido identificado, por lo que Planck y sus contemporáneos estaban en gran medida a oscuras en relación con lo que podían ser exactamente aquellos osciladores). El modelo de Planck pasó por sucesivos perfeccionamientos en un intento de obtener un encaje perfecto entre la teoría y los experimentos. Finalmente, Planck lo consiguió, pero sólo a costa de incluir en su modelo la idea de lo que él denominó «elementos de energía», por analogía con los elementos químicos. En este modelo, la energía total de todos esos osciladores que se encuentran en un cuerpo negro se divide en un número finito (pero muy grande) de partes iguales (pero diminutas), determinado por una constante a la que llamó a *h*.[*] Esta constante ha pasado a la historia con el nombre de constante de Planck. Planck hizo pública esta versión de su modelo en una reunión de la Academia de las Ciencias de Berlín, el 14 de diciembre de 1900. En parte por la coincidencia (cuestión de calendario) de que esta teoría «revolucionaria» se presentara al comienzo del siglo XX, esta fecha se suele considerar como el inicio de la revolución cuántica dentro de la física. Sin embargo, ni Planck, ni los colegas suyos que asistieron a la presentación, pensaron de esta manera. No consideraban los cuantos de energía como algo real, sino como un artilugio matemático temporal que desaparecería cuando se desarrollara un modelo mejor. Después de todo, el modelo de Planck ya había pasado por muchas modificaciones; ¿por qué no iba a ser posible se-

guir ajustándolo? En aquella época nadie sugirió, ni Planck, ni ningún otro, que la noción de cuantos de energía se correspondiera con una realidad física. La auténtica revolución cuántica comenzó cinco años más tarde, cuando Albert Einstein hizo su primera contribución espectacular al debate.

ALBERT EINSTEIN Y LOS CUANTOS DE LUZ

De todos los informes que Einstein publicó en 1905, el único que él destacó personalmente como «muy revolucionario»[11] fue el que versaba sobre los cuantos de luz (no fue el único que lo valoró así, ya que se trata del trabajo por el que recibió finalmente el Premio Nobel). Einstein utilizó un planteamiento termodinámico distinto del de Planck, basándose en la derivación probabilística que hizo Boltzmann relacionando probabilidad y entropía, y descubrió que la radiación electromagnética se comporta «como si estuviera constituida por cuantos de energía independientes entre sí».[12] Calculó que, cuando un «oscilador» (es decir, un átomo) emitía o absorbía una radiación electromagnética, lo hacía en unidades discretas que eran múltiplos de $h\nu$, donde ν es la frecuencia de la radiación que se emite o se absorbe (la frecuencia es esencialmente el inverso de la longitud de onda). En aquel mismo informe breve, Einstein explicó el modo en que la radiación electromagnética puede expulsar electrones de la superficie de un trozo de metal —el efecto fotoeléctrico. En 1902, Philipp Lenard, continuando en la línea de estudios anteriores sobre el efecto fotoeléctrico, había descubierto que, cuando se proyecta luz de una determinada longitud de onda (de un color determinado) sobre una superficie, los electrones emitidos tienen todos ellos la misma energía, pero esta energía es diferente para diferentes longitudes de onda de la luz. No importaba que la fuente de luz fuera más brillante o más débil —el número de electrones emitidos era mayor

cuando la luz era más brillante, pero cada uno de ellos seguía teniendo la misma energía—. Esto se podía explicar, en el modelo de Einstein, si la luz de una longitud de onda determinada (frecuencia) estaba formada por un chorro de cuantos de luz individuales, cada uno de ellos con la misma energía $h\nu$. Cada uno de estos cuantos puede dar la misma cantidad de energía a un electrón del metal, razón por la cual todos los electrones emitidos tienen la misma energía. Sin embargo, el fenómeno descubierto por Lenard no podía explicarse de ninguna manera con el modelo ondulatorio de la luz. Aunque Einstein recalcó la índole provisional de sus teorías (incluso en el título del informe: «Sobre un enfoque heurístico con respecto a la producción y transformación de la luz»), a diferencia de Planck, parecía estar convencido en su fuero interno de que los cuantos de luz (no se bautizaron como «fotones» hasta 1926, cuando el químico estadounidense Gilbert Lewis les dio este nombre) eran reales. Aceptó plenamente que se trataba de una teoría revolucionaria y explicó lo siguiente:

> Según la hipótesis que hemos considerado aquí, en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual, la energía no se distribuye de forma continua por volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que está formada por un número finito de cuantos de energía localizados en puntos concretos del espacio y estos cuantos se desplazan sin dividirse, pudiendo ser generados o absorbidos únicamente como unidades completas.

Este párrafo marca el auténtico comienzo de la revolución cuántica. Dependiendo de los distintos experimentos, se podía considerar que la luz se comportaba como una onda (el experimento de la doble rendija) o como un chorro de partículas (según el efecto fotoeléctrico). ¿Cómo podía ser esto?

Los contemporáneos de Einstein eran muy conscientes de las consecuencias revolucionarias de este planteamiento, pero no estaban en absoluto convencidos. Había una persona en particular que se enfureció ante lo que consideraba un absurdo

y, además, estaba en situación de poder hacer algo al respecto. Se trataba de Robert Millikan (1868-1953), un físico experimental estadounidense que trabajaba en la Universidad de Chicago. No podía admitir la idea de que los cuantos de luz existieran en la realidad y se decidió a demostrar que la interpretación del efecto fotoeléctrico formulada por Einstein era errónea. Tras realizar una larga serie de difíciles experimentos, lo único que pudo demostrar fue que Einstein tenía razón y, de paso, consiguió calcular un valor muy preciso de la constante de Planck: $6{,}57 \times 10^{-27}$. En la mejor tradición científica, fue esta confirmación experimental de la hipótesis de Einstein la que puso de manifiesto claramente, hacia 1915, que había algo interesante en la idea de los cuantos de luz (y resultó aún más impactante por el hecho de que dicha confirmación la obtuviera precisamente un escéptico que intentaba demostrar que aquella idea era errónea). Hacia el final de su vida, Millikan comentaba pesaroso: «invertí diez años de mi vida comprobando aquella fórmula que planteó Einstein en 1905 y, en contra de todas mis expectativas, en 1915 me vi obligado a reconocer que se había confirmado sin ambigüedades, a pesar de no resultar razonable».[13] El consuelo de Millikan fue el Premio Nobel de física que recibió en 1923, por su obra y por la excelente precisión de su medición de la carga del electrón; no es casualidad que a Einstein se le concediera el Premio Nobel en 1922 (aunque realmente era el de 1921, que se había pospuesto al año siguiente). Pero para entonces la idea de los cuantos ya había demostrado su utilidad para explicar el comportamiento de los electrones dentro de los átomos, aunque todavía no se comprendía totalmente el fenómeno cuántico.

El problema que planteaba el modelo atómico de Rutherford —consistente en un diminuto núcleo central rodeado de una nube de electrones que se mueven en un espacio vacío— era la falta de algo que impidiera a los electrones caer sobre el núcleo.

Después de todo, el núcleo tiene carga positiva y los electrones tienen carga negativa, por lo que han de atraerse mutuamente. Para buscar un modo de estabilizar este sistema, se podría establecer una analogía con los planetas que giran en órbitas alrededor del Sol, pero desgraciadamente tal analogía no se sostiene. Por supuesto, los planetas son atraídos por el Sol mediante la fuerza de la gravedad y «querrían» caer hacia él, pero su movimiento los mantiene en sus órbitas, ya que en cierto sentido la fuerza centrífuga compensa el tirón de la gravedad. Pero los electrones no pueden describir órbitas alrededor del núcleo de la misma manera, porque tienen carga eléctrica y, además, dado que tienen que cambiar de dirección para moverse en una órbita alrededor del núcleo, tienen una aceleración en el caso de la Luna cuando describe su órbita alrededor de la Tierra, la aceleración significa un cambio en la velocidad o en la dirección del movimiento, o en ambas—. Una carga eléctrica que se acelera emitirá energía en forma de ondas electromagnéticas y, a medida que pierde energía, un electrón «en órbita» alrededor de un núcleo caería en dicho núcleo describiendo una espiral y el átomo se colapsaría en una escala de tiempo del orden de una diezmilmillonésima de segundo.[14] No hay modo de resolver este dilema en el marco de la física clásica de Newton y Maxwell. La razón por la que los átomos son estables se explica totalmente gracias a la física cuántica, y la primera persona que se dio cuenta de cómo podría suceder esto fue el danés Niels Bohr.

Niels Bohr. El primer modelo cuántico del átomo

Bohr nació en Copenhague el 7 de octubre de 1885. Procedía de una familia de académicos (su padre fue catedrático de fisiología en la Universidad de Copenhague y Harald, hermano de Niels, llegó a ser catedrático de matemáticas en la misma

universidad) y recibió una buena educación científica, que culminó con un doctorado en física de la Universidad de Copenhague en 1911 (su padre había muerto de un ataque al corazón unos pocos meses antes). En septiembre de 1911 fue a trabajar por un año bajo la dirección de J. J. Thomson en el Cavendish Laboratory, pero le resultó difícil adaptarse, en parte por su inglés imperfecto y su timidez, en parte porque sus intereses dentro de la investigación no encajaban bien con los de aquella institución en aquella época, y en parte porque J. J. Thomson, que entonces tenía una edad en torno a los 55 años, no era ya tan receptivo a las ideas nuevas como lo había sido en otros tiempos. No obstante, en octubre Rutherford pronunció una conferencia en Cambridge, explicando su último trabajo y causando una fuerte impresión en el joven Bohr. Un mes más tarde, Bohr fue a Manchester a visitar a un antiguo colega de su padre; este amigo de la familia, a instancias de Bohr, invitó a Rutherford a que se reuniera con ellos para cenar. A pesar de la barrera del lenguaje, Rutherford y Bohr hicieron buenas migas inmediatamente, ya que, además de tener ambos intereses científicos comunes, Rutherford comprendía lo que era sentirse intruso en Cambridge cuando uno está empezando la carrera profesional. Como consecuencia de este encuentro, en marzo de 1912 Bohr se trasladó a Manchester para pasar allí los últimos seis meses de su estancia en Inglaterra. Fue en Manchester donde desarrolló el primer modelo cuántico del átomo, basado directamente en el modelo de Rutherford, aunque le llevó más de seis meses terminar este trabajo.

Bohr regresó a Dinamarca durante el verano de 1912, se casó con su novia Margrethe Norlund el 1 de agosto y en otoño ocupó un puesto de docente en la Universidad de Copenhague. Fue allí donde terminó una trilogía de informes sobre la estructura del átomo, que fueron publicados todos ellos antes de finalizar el año 1913 y que constituyeron la base del trabajo por el

que recibiría el Premio Nobel en 1922. La gran genialidad, o habilidad, de Bohr a lo largo de toda su carrera fue saber hilvanar todos los elementos de la física que resultaran necesarios con el fin de elaborar, para cualquier fenómeno, un modelo que funcionase. No se preocupaba demasiado por la coherencia interna del modelo, siempre que éste fuera útil para dar una imagen de lo que estaba sucediendo y, cosa que era decisiva, proporcionara predicciones que encajaran con los resultados de los experimentos. El modelo atómico de Rutherford-Bohr, por ejemplo, contiene elementos de la teoría clásica (la idea de los electrones describiendo órbitas) y elementos de la teoría cuántica (la idea de que la energía sólo se emite o se absorbe en cuantos discretos, $h\nu$); pero, sin embargo, contenía las ideas de física suficientes para sacar de apuros a los físicos hasta que pudieran encontrar algo mejor. De hecho, la teoría física que aporta es tan buena que sigue siendo en esencia el modelo que estudiamos en la escuela y prácticamente no es necesario que demos aquí más detalles al respecto. Bohr dijo que los electrones tenían que permanecer en las órbitas que describen alrededor del núcleo porque no son capaces físicamente de emitir una radiación de forma continua, como lo tendrían que hacer si se cumplieran las leyes clásicas. Un electrón sólo puede emitir cuantos de energía, de uno en uno, y esto se corresponde con el hecho de que dicho electrón salta de una órbita a otra, como si el planeta Marte emitiera de repente un estallido de energía y apareciera en la órbita de la Tierra. Cada órbita estable corresponde a una cierta cantidad fija de energía, pero no existen órbitas intermedias, por lo que es imposible que un electrón se mueva recorriendo una trayectoria en espiral hacia el interior del átomo. Entonces, ¿por qué no se van todos los electrones de un salto hasta el núcleo? Bohr argumentó (completamente *ad hoc*) que cada una de las órbitas posibles sólo tenía «espacio» para un cierto número de electrones, y que los electrones que

estuvieran más apartados del núcleo no podían entrar de un salto en órbitas más internas que ya estaban llenas (del mismo modo que Marte no podría, según esta analogía, meterse en la órbita de la Tierra, porque ya está ocupada por la propia Tierra). En el caso de los electrones más cercanos al núcleo, sucedería sencillamente que tienen prohibido entrar en el centro del átomo, pero la explicación de esto último todavía se haría esperar (como ya veremos, llegó un poco más de diez años después, cuando Wemer Heisenberg descubrió el principio de incertidumbre).

Todo esto, por supuesto, es poco más que un gesto de cara a la galería, un modelo bonito sin fundamentos estructurales. Pero Bohr hizo algo mucho mejor que esto. Cada «salto» de un electrón de una órbita a otra se corresponde con la emisión de un determinado cuanto de energía, que corresponde a una determinada longitud de onda de la luz. Si un gran número de átomos (por ejemplo, una muestra de gas hidrógeno) están todos irradiando energía de esta manera, los cuantos (fotones) formarán en conjunto una línea brillante en el espectro en la posición correspondiente a esa longitud de onda. Cuando Bohr introdujo las matemáticas en este modelo y calculó cómo sería emitida la energía al saltar los electrones a niveles inferiores (o, a la inversa, cómo se absorbería energía cuando los electrones saltaran de una órbita posible a otra de nivel superior), descubrió que las posiciones de las líneas espectrales que predecía el modelo encajaban exactamente con las posiciones de las líneas observadas en los espectros experimentales.[15] La física cuántica había explicado por qué y cómo cada elemento producía su propia huella dactilar única en el espectro. El modelo podía ser un endiablado mosaico de ideas viejas y nuevas, pero funcionaba.

Las preguntas a las que daba respuesta el modelo de Rutherford-Bohr eran tantas como las que dejaba planteadas, pero de-

mostraba que el camino para avanzar en estas teorías pasaba por la física cuántica y, junto con la obra teórica de Einstein y los experimentos de Millikan, señalaba la ruta que se tenía que seguir para avanzar hacia una teoría cuántica completa, que se desarrollaría en la década de 1920. El propio Bohr se convirtió en un experto cotizado tan pronto como se propagaron algunas filtraciones relativas a este trabajo, incluso antes de que publicara los tres informes. A comienzos de 1914, la Universidad de Copenhague ofreció la creación de una cátedra de física teórica para Bohr, si éste deseaba aceptarla. Entonces Rutherford le escribió ofreciéndole un nombramiento para dos años en Manchester como lector, un puesto que dejaba a su titular tiempo libre para dedicarse a la investigación, sin tener que realizar tareas docentes o administrativas. Tras convencer a la Universidad de Copenhague para que le esperara, Bohr, que entonces sólo tenía 29 años de edad, aprovechó aquella oportunidad de trabajar con Rutherford durante una temporada. A pesar del comienzo de la guerra (Dinamarca se mantuvo neutral durante la primera guerra mundial), los Bohr llegaron sanos y salvos a Inglaterra en un barco, y a su debido tiempo, en 1916, hicieron el viaje de regreso. Aunque recibió varias ofertas, incluido un puesto fijo y definitivo en Manchester, Bohr prefirió quedarse en Dinamarca, donde su prestigio le permitió obtener financiación para crear un centro de investigación, llamado Instituto de Física Teórica, en Copenhague —conocido actualmente como Instituto Niels Bohr. El instituto atrajo durante los años siguientes a la mayoría de los grandes físicos de la época para visitas breves o estancias largas y constituyó un foro donde se podía discutir a fondo sobre las teorías relativas a la nueva física cuántica. En la década de 1930, el propio Bohr se interesó por la física nuclear y la posibilidad de obtener energía mediante la fisión nuclear; cuando Dinamarca fue ocupada por tropas alemanas durante la segunda guerra mundial, le produjo

una gran preocupación la posibilidad de que los nazis consiguieran armas atómicas y escapó a Gran Bretaña a través de Suecia. Junto con su hijo Aage Bohr (que también recibió un premio Nobel, en 1975) trabajó como asesor en el Proyecto Manhattan. Después de la guerra, Niels Bohr promovió los usos pacíficos de la energía atómica y fue una de las figuras destacadas que participaron en la fundación del CERN, el centro europeo para la investigación de la física de partículas creado en Suiza. Falleció el 18 de noviembre de 1962 y fue su hijo Aage Bohr quien le sucedió en la dirección del Instituto de Física Teórica de Copenhague.

Una de las mejores características del modelo atómico de Bohr y de los perfeccionamientos de que fue objeto en la década de 1920 fue que proporcionaba una base para comprender la química —es decir, cómo y por qué algunos elementos reaccionaban entre sí para formar compuestos, mientras otros no lo hacían—. Pero reservaremos esta historia para el próximo capítulo, donde trataremos de la química de la vida. De momento, lo que queremos es continuar nuestro viaje hacia el interior del átomo, para ver cómo la nueva física cuántica condujo al conocimiento del núcleo y abrió las puertas al nuevo mundo de la física de partículas.

Louis de Broglie

Dejando a un lado muchas pistas y caminos falsos que terminaron en callejones sin salida, y los detalles de algunos importantes trabajos técnicos sobre la estadística de los cuantos de luz, el siguiente paso decisivo hacia la física cuántica llegó en 1924, cuando el físico francés Louis de Broglie (1892-1987) expuso su tesis doctoral en la Sorbona (publicada en 1925), presentando en ella la teoría de que, al igual que las ondas electromagnéticas se podían explicar en términos de partículas, todas

las partículas de la materia, tales como los electrones, se podían explicar en términos de ondas. De Broglie comenzó tarde con la física (con más de treinta años, cuando leyó aquella tesis), por una parte debido a que su aristocrática familia había intentado que entrara en la carrera diplomática, para lo cual empezó a estudiar historia en la Sorbona en 1909, antes de pasarse a la física muy en contra de los deseos de su padre, y por otra parte también a causa de la primera guerra mundial, durante la cual prestó servicios como especialista en radio, destinado a la Torre Eiffel. Pero lo cierto es que supo recuperar el tiempo perdido, concibiendo una idea clave para comprender el mundo subatómico, gracias a la cual ganó el Premio Nobel en 1929. Aquella idea resultaba extraordinariamente sencilla, pero era como una burla al sentido común.

De Broglie partió de dos fórmulas relativas a los cuantos de luz (de ahora en adelante los llamaremos fotones, aunque este término se acuñó un par de años después de realizarse este trabajo). Una de ellas la conocemos ya: $E = h\nu$ La otra la había deducido Einstein a partir de la teoría de la relatividad y relaciona el momento de un fotón (p, puesto que m se ha utilizado ya para la masa) con la velocidad a la que se mueve (c, la velocidad de la luz) y la energía que transporta: $E = pc$. Poniendo estas dos ecuaciones juntas, De Broglie obtuvo $h\nu = pc$, o $p = h\nu/c$ Dado que la longitud de onda de la radiación electromagnética (habitualmente expresada mediante la letra griega lambda, λ) se relaciona con la frecuencia mediante la fórmula $\lambda = c/\nu$, esto significa que $p\lambda = h$. Dicho en palabras, el momento de una «partícula» multiplicado por su longitud de onda es igual a la constante de Planck. En 1924, esta idea no resultaba tan sorprendente en relación con la luz, pero De Broglie sugirió que también era aplicable a otras partículas tradicionales, y en particular a los electrones. Basándose en esto, desarrolló un modelo atómico en el que los electrones estaban representados por on-

das que se desplazaban por las «órbitas», como una serpiente sinuosa que se muerde la cola. De Broglie dijo que los diferentes niveles de energía de los electrones del átomo se corresponden con distintos armónicos de estas ondas, como cuando se tocan las notas en una cuerda de guitarra, y que sólo podían existir órbitas en las que estos armónicos encajaran exactamente, reforzándose entre sí los picos y los valles de la onda, en vez de anularse unos a otros. El director de su tesis, Paul Langevin (1872-1946), se quedó anonadado ante todo esto y mostró la tesis a Einstein, quien opinó que era un trabajo coherente y que constituía bastante más que un mero juego matemático.

De Broglie obtuvo su título de doctor y, cuando se le preguntó en el examen oral cómo podría comprobarse su teoría, indicó que según su fórmula los electrones deberían tener exactamente las longitudes de onda adecuadas para sufrir una difracción al atravesar las redes cristalinas. En dos experimentos independientes realizados en 1927, uno por Clinton Davisson (1881-1958) y Lester Germer (1896-1971) en Estados Unidos, y otro por George Thomson (1892-1975) en Aberdeen, Escocia, se confirmó la predicción de De Broglie. Davisson y Thomson compartieron en 1937 el Premio Nobel; Germer se lo perdió, presumiblemente porque «sólo» era un estudiante cuando hizo este trabajo con Davisson. Sin embargo, como se ha dicho a menudo, el Premio Nobel compartido que se concedió a George Thomson, el hijo de J. J. Thomson, ilustra maravillosamente el hecho de que la naturaleza del mundo cuántico está más allá de lo que nos diría el sentido común. J. J. obtuvo el premio por demostrar que los electrones son partículas. A George se le concedió por demostrar que los electrones son ondas. La verdad es que ambos tenían razón.

Para entonces, se había logrado también lo que se considera la prueba definitiva de que los fotones existen, y esta prueba surgió de los trabajos de Arthur Compton (1892-1962), realiza-

dos primero en la Universidad de Washington, en San Louis, y luego en Chicago. En una serie de experimentos en los que los rayos X sufrían una dispersión por efecto de los electrones contenidos en los átomos, Compton determinó a finales de 1923 que esta dispersión sólo podía explicarse hablando de un intercambio de momentos entre partículas. Recibió el Premio Nobel por este trabajo en 1927. Como otro ejemplo de la extraña lógica que opera en el mundo cuántico, baste decir que fue este trabajo —que trataba a los electrones como partículas— para llegar a determinar que la radiación electromagnética es a la vez onda y partícula el que, en parte, inspiró a De Broglie la idea de demostrar que los electrones se pueden comportar también como ondas. Lo que la fórmula de De Broglie nos dice es que «todo» tiene un carácter dual de onda y partícula. Debido a que el momento está relacionado con la masa (excepto en el caso de la luz, que es a menudo un caso especial y donde los fotones no tienen masa en el sentido habitual del término) y puesto que la constante de Planck tiene un valor tan pequeño, el «carácter de onda» de un objeto cotidiano, tal como una persona, una casa o una pelota, es tan insignificante que nunca se puede percibir. El carácter de onda sólo llega a ser importante cuando la masa de un objeto tiene (en las unidades apropiadas) aproximadamente un valor igual o menor que la constante de Planck. Esto significa que el aspecto ondulatorio de la dualidad onda-partícula prácticamente no tiene relevancia por encima del nivel molecular, no puede ser totalmente ignorado en el caso de átomos completos, es un factor importante para explicar el comportamiento de los protones y los neutrones, y es absolutamente crucial a la hora de intentar explicar el comportamiento de los electrones dentro o fuera del átomo. Este aspecto ondulatorio también nos dice que no hay esperanza alguna de que podamos entender lo que es «realmente» un electrón si nos remitimos a la experiencia cotidiana y de sentido común. Lite-

ralmente no se parece a nada que hayamos visto jamás. Todo lo que podemos esperar es hallar ecuaciones o fórmulas —modelos matemáticos— que nos digan cómo se comportan los electrones en distintas circunstancias, a veces más bien como una onda, y otras veces más como una partícula. Esto es exactamente lo que estaba pasando en la mecánica cuántica, apenas un poco antes de que se secara la tinta con la que De Broglie estaba escribiendo su tesis.

La ecuación de onda de Erwin Schrödinger para los electrones. El planteamiento basado en las partículas para explicar el mundo cuántico de los electrones

Este modelo matemático tan completo que explicaba el comportamiento de los electrones contenidos en los átomos no se desarrolló una sola vez, sino dos veces durante los meses siguientes a la publicación de las teorías de De Broglie. La línea directa que partía de De Broglie llegó hasta el físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), catedrático de física en Zurich, que desarrolló un modelo basado completamente en las ondas. Schrödinger se sentía feliz al pensar que había devuelto algo de cordura al extraño mundo de la física subatómica, explicándola mediante algo tan cómodo y familiar como una ecuación de onda. Pero para la época en que se publicó su obra, en 1926, ya se le había adelantado en la imprenta otra descripción matemática completa del comportamiento de los electrones en los átomos, que ponía el énfasis esencialmente en el planteamiento de los electrones como partículas y en el salto cuántico de un nivel de energía al siguiente. Este planteamiento fue esbozado inicialmente por el alemán Werner Heisenberg (1901-1976), y pronto fue asumido y desarrollado por sus colegas de la Universidad de Gotinga Max Born (1882-1970) y Pas-

cual Jordan (1902-1980), para ser luego adoptado por el joven físico británico Paul Dirac (1902-1984). Dirac desarrolló en principio un formalismo matemático más abstracto para explicar el comportamiento de los electrones en los átomos (¡una tercera teoría cuántica completa!), demostrando posteriormente que los otros dos planteamientos estaban en realidad incluidos en dicho formalismo y eran matemáticamente equivalentes entre sí, del mismo modo que, cuando elegimos entre medir una distancia en millas o medirla en kilómetros, la opción tomada no cambia la distancia que estamos midiendo. Todos estos científicos, excepto Jordán (una misteriosa aberración por parte del comité de los premios Nobel), acabaron recibiendo premios Nobel por sus diversas contribuciones a la teoría cuántica.

El resultado de este frenesí de actividades fue que en 1927 los físicos disponían de todo un surtido de modelos matemáticos que podían utilizar para calcular el comportamiento de entidades cuánticas entre las que figuraban los electrones. La mayoría, como Schrödinger, prefería la comodidad de trabajar con una ecuación de onda que les resultaba familiar; sin embargo, no había que pensar de ningún modo que esto implicase que la versión ondulatoria de la realidad cuántica contenía una verdad más profunda que la versión corpuscular o mediante partículas (en todo caso, por lo familiar que resultaba, el planteamiento mediante la mecánica ondulatoria puede encubrir la auténtica naturaleza del mundo cuántico). Se trata simplemente de facetas distintas de un todo que es en cierto modo diferente de cualquier cosa que podamos ver en nuestra realidad cotidiana, pero que a veces puede comportarse como una partícula y a veces como una onda. Los científicos siguen aún discutiendo sobre qué puede significar todo esto «realmente», pero para lo que aquí nos ocupa es suficiente tomar el planteamiento pragmático y decir que la mecánica cuántica funciona, en el sentido

de que hace predicciones que luego se confirman en los experimentos, por lo que no es especialmente relevante lo que significa.

El principio de incertidumbre de Heisenberg: La dualidad onda-partícula

Sin embargo, Heisenberg hizo otra contribución a la física cuántica que es digna de ser comentada aquí: su famoso principio de incertidumbre. Este principio está relacionado con la idea de dualidad onda-partícula y dice que ciertos pares de propiedades cuánticas, tales como la posición y el momento, nunca pueden precisarse con exactitud ambas al mismo tiempo; siempre queda un residuo de incertidumbre (relacionado con el tamaño de la constante de Planck, por lo que sus efectos sólo se manifiestan a escalas muy pequeñas) en el valor de al menos uno de estos parámetros. Cuanto mayor sea la precisión con que se determina una de las propiedades del par, menor es la precisión con que se determina la otra. Esto «no» es simplemente cuestión de que nuestros aparatos hagan mediciones imperfectas porque perturben el mundo cuántico cuando intentamos medirlo, es decir, por ejemplo, que al intentar medir la posición de un electrón le demos un empujón y cambiemos su momento. Es una característica fundamental del mundo cuántico, de tal forma que el propio electrón no «conoce» al mismo tiempo dónde está exactamente y adonde va exactamente en un momento dado. Como escribió el propio Heisenberg en un informe publicado en 1927, «en principio, *no podemos* conocer el presente con todos sus detalles».

Este aspecto del modo en que funciona el universo resultó ser tan fundamental que es posible construir todo el edificio de la mecánica cuántica partiendo del principio de incertidumbre, aunque éste no es lugar para entrar a fondo en esta cuestión.

Sin embargo, el poder del principio de incertidumbre se puede vislumbrar volviendo al misterio de por qué los electrones que están en el átomo no caen todos ellos sobre el núcleo, aunque lo tuvieran que hacer mediante una serie de saltos, en vez de describir una espiral hacia el interior. Cuando un electrón está en órbita alrededor de un núcleo, su momento queda muy bien determinado por las propiedades de su órbita, por lo que toda la incertidumbre existente en el par momento-posición ha de concentrarse en la posición —podría estar a un lado de la órbita o en el otro lado (o, si se prefiere otra imagen, podría ser una onda que se propaga por toda la órbita)—. Ahora bien, si cayera directamente en el núcleo, su posición quedaría muy bien determinada, precisamente dentro del volumen del núcleo. Su momento también estaría muy bien determinado, ya que el electrón no se desplazaría hacia ningún lugar. Esto violaría el principio de incertidumbre (si se quiere pensar de otro modo, se podría decir que el núcleo es demasiado pequeño para que la onda asociada con el electrón cupiera en él. Si se introducen los números adecuados, con el momento adecuado que tiene un electrón dentro de un átomo, resulta que el tamaño de la órbita más pequeña que recorre un electrón dentro de un átomo es tan pequeño como pueda ser sin violar el principio de incertidumbre. Mediante el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica se determinan los tamaños auténticos de los átomos y el hecho de que, después de todo, ¡los átomos existen!).

La ecuación de Dirac para el electrón

Fueron necesarias un par de décadas después de los progresos realizados a mediados de la de 1920 para atar todos los cabos perdidos. Esto fue debido en parte a la interrupción y a la desorganización que se produjo en la investigación científica a causa de la segunda guerra mundial. Sin embargo, antes de que

llegara esta interrupción se registraron dos nuevos avances científicos que resultaron cruciales. En 1927, Dirac publicó un informe en el que presentaba una ecuación de onda para un electrón que satisfacía plenamente los requisitos de la teoría especial de la relatividad; esta ecuación fue la última y definitiva palabra sobre el tema, «la» ecuación del electrón. Sin embargo, curiosamente esta ecuación tenía dos soluciones, casi de la misma manera que una ecuación sencilla y trivial como $x^2 = 4$ tiene dos soluciones: $x = 2$ y $x = -2$. Pero ¿qué significaba en la ecuación de Dirac la «solución negativa», en este caso mucho más complicada? Parecía referirse a una partícula que tuviera unas propiedades opuestas a las del electrón: entre otras, la más notable sería poseer carga positiva en vez de carga negativa. Al principio, Dirac intentó hacer que esta solución encajara con el protón, que de hecho tiene carga positiva, pero, por supuesto, tiene una masa muy excesiva para ser un «electrón negativo». [16] En 1931, Dirac constató (junto con otros investigadores) que la ecuación predecía en realidad la existencia de una partícula hasta entonces desconocida, que tendría la misma masa que el electrón, pero con carga positiva. Investigaciones posteriores sobre esta ecuación planteaban la teoría de que, si había suficiente energía disponible (por ejemplo, procedente una radiación gamma), entonces esa energía se podría convertir, en consonancia con la fórmula de Einstein $E = mc^2$, en un «par» de partículas: un electrón ordinario y un electrón negativo. Pero la energía no podía convertirse en una sola partícula, y tampoco en dos electrones ordinarios, ya que esto violaría el principio de la conservación de la carga eléctrica; sin embargo, si se creara un par positivo-negativo, todas las propiedades, excepto la masa (creada por la energía suministrada), se compensarían entre sí, anulándose.

LA EXISTENCIA DE LA ANTIMATERIA

En varios experimentos realizados en 1932 y 1933, Carl Anderson (1905-1991), que trabajaba en Instituto de Tecnología de California, encontró el rastro de esta hipotética partícula de carga positiva cuando estudiaba los rayos cósmicos. Aunque no se dio cuenta de que el positrón, que es como él lo llamó, se había originado en realidad en la cámara de niebla utilizada para estudiar los rayos cósmicos, como consecuencia del proceso de producción de pares predicho por Dirac, sin embargo otros científicos no tardaron en relacionar ambas cosas. La antimateria, que fue el nombre por el que se conoció esta dualidad, era una característica real del mundo físico y actualmente sabemos que todo tipo de partícula tiene una antimateria equivalente dotada de propiedades cuánticas opuestas.

La fuerza nuclear fuerte

Para ver en perspectiva el último descubrimiento crucial de la década de 1930, hemos de retroceder unos diez años, hasta principios de la década de 1920. En aquella época, todavía no se había descubierto el neutrón y existían varios modelos para la partícula alfa con la que se intentaba explicar esta partícula como una combinación de cuatro protones y dos electrones. Se veía claro que una combinación así no se podría sostener y tendría que explotar y disgregarse a causa de la repulsión electrostática. En un informe publicado en 1921, Chadwick y su colega Étienne Bieler escribieron que este tipo de modelo de la partícula alfa era correcto, que sus componentes tendrían que mantenerse unidas por «fuerzas de una intensidad muy grande», y llegaron a la siguiente conclusión: «tenemos planteada la necesidad de encontrar algún campo de fuerza que reproduzca estos efectos».[17] Esta conclusión es aplicable con el mismo rigor a los modelos que consideran que la partícula alfa está formada por dos protones y dos neutrones, y también, de hecho, a

todos los núcleos, que son esencialmente unas bolas formadas por neutrones y protones, dotadas de una carga global positiva. Algún tipo de fuerza fuerte, que a distancias muy cortas, como el diámetro de un núcleo, sería más fuerte que la fuerza eléctrica, debería superar la repulsión eléctrica y mantener unido todo lo que hay en el núcleo. De una manera bastante prosaica, a esta fuerza se le dio el nombre de «fuerza nuclear fuerte» o sencillamente «fuerza fuerte». Otros experimentos posteriores demostraron que esta fuerza es unas cien veces más fuerte que la fuerza eléctrica, razón por la cual hay alrededor de cien protones en el núcleo estable más grande que se conoce; si hubiera más protones, la repulsión eléctrica superaría a la fuerza fuerte, haciendo que el núcleo explotase y se disgregase. Pero la fuerza nuclear fuerte, a diferencia de la fuerza eléctrica, la fuerza magnética y la fuerza gravitatoria, no obedece a una ley del inverso del cuadrado. Desde luego es muy intensa en un radio de 10^{-13} centímetros, pero no produce un efecto sensible más allá de este radio de acción. Esta es la razón por la cual los núcleos tienen el tamaño que tienen —si la fuerza nuclear fuerte tuviera un alcance mayor, los núcleos tendrían en correspondencia un tamaño más grande.

La última pieza del puzzle atómico quedó por fin colocada en su lugar, dentro de un puzzle que había ido adquiriendo cada vez mayor importancia durante toda la década de 1920. Esta pieza era el proceso de la desintegración beta, en la que un átomo (en realidad el núcleo de un átomo) emite un electrón[*] y se convierte en un átomo del elemento que ocupa la casilla situada a su derecha en la tabla periódica. Una vez que el neutrón fue descubierto, quedó claro que lo que sucede en este proceso es que un neutrón se transforma en un protón y un electrón. Los neutrones se desintegran espontáneamente de esta manera cuando se quedan abandonados a su suerte fuera del núcleo de un átomo. Sin embargo, es importante observar que de ningún

modo sucede que el electrón esté «dentro» del neutrón y se escape de allí —como se desprende claramente, entre otras cosas, de la incertidumbre cuántica, esto no es posible. Lo que sucede es que la masa-energía de un neutrón se convierte en la masa-energía de un electrón y un protón, quedando una parte de la masa-energía inicial para proporcionar la energía cinética necesaria para que el electrón salga a toda velocidad del lugar donde se produce la desintegración.

El enigma estaba en el hecho de que el electrón que salía de esta manera y a toda velocidad de un núcleo parecía capaz de transportar cualquier cantidad de energía, hasta un valor máximo claramente definido. Esto difería bastante del comportamiento de las partículas alfa que eran emitidas durante la desintegración alfa. En la desintegración alfa, todas las partículas emitidas por un tipo determinado de núcleo pueden emerger con la misma energía cinética, o pueden emerger con una cierta energía menor, pero van acompañadas de una radiación gamma, que es una radiación energética. Las energías transportadas por la partícula alfa y por la radiación gamma siempre se suman dando el mismo máximo de energía para un tipo determinado de núcleo, y la energía liberada de esta forma es igual a la diferencia de masa-energía existente entre el núcleo original y el que resulta después de la desintegración —por lo que la energía se conserva. Pero las partículas alfa emitidas sólo pueden tener ciertas cantidades discretas de energía, porque los fotones de la radiación gamma se presentan como cuantos de energía y sólo pueden transportar ciertas cantidades discretas de energía como contribución por su parte al total. De manera similar, el momento y el momento angular se conservan en la desintegración alfa. Pero en la radiación beta, aunque había un máximo de energía claramente definido para los electrones emitidos por un determinado tipo de núcleo, parecía que estos electrones podían emerger con cualquier cantidad de energía

inferior a dicho máximo, como ellos quisieran, pudiendo bajar hasta casi el cero de energía, y no había ningún fotón acompañante que se llevara la energía sobrante. Al principio, daba la impresión de que los experimentos podían estar equivocados, pero a finales de la década de 1920 quedó claro que existía realmente un «espectro» continuo de energías del electrón, asociadas con la desintegración beta. Parecía que otras propiedades tampoco se conservaban en este proceso, pero aquí no es necesario que entremos en más detalles.

A finales de 1930, Wolfgang Pauli (1900-1958) planteó una hipótesis especulativa para explicar lo que estaba sucediendo. Podremos valorar lo asombrosa que les pareció esta hipótesis a muchos de sus colegas si recordamos que en aquella época las dos únicas partículas tradicionales que los físicos conocían eran el electrón y el protón (incluso entonces el fotón no estaba considerado como partícula de la misma manera que las mencionadas, y el neutrón estaba aún por descubrir), de tal modo que cualquier sugerencia sobre la posible existencia de otra «nueva» partícula (y no digamos la existencia de una partícula que además era invisible) era casi un sacrilegio. En una carta fechada el 4 de diciembre de 1930, Pauli escribió lo siguiente:

> He encontrado una salida desesperada… A saber, la posibilidad de que en el núcleo pudieran existir partículas eléctricamente neutras, que llamaré neutrones… El espectro beta continuo sería entonces comprensible a partir del supuesto de que en la desintegración beta se emite un neutrón junto con el electrón, de tal modo que la suma de las energías del electrón y el neutrón es constante.[18]

En otras palabras, el «neutrón» de Pauli desempeñaba la misma función que la radiación gamma en la desintegración alfa, pero con la diferencia de que podía transportar cualquier cantidad de energía cinética, hasta el máximo disponible, y no se presentaba en cuantos de la misma forma en que se presentaban los fotones de la radiación gamma.

Una señal del escaso impacto que tuvo el remedio desesperado de Pauli es que durante dos años el nombre *neutrón* se había aplicado a la partícula nuclear identificada por Chadwick, que desde luego no era en absoluto la partícula en la que había pensado Pauli. Pero el problema del «espectro beta continuo» no se podía descartar, por lo que en 1933 Enrico Fermi (1901-1954), con la ventaja de saber que el neutrón existía, tomó la idea de Pauli y la desarrolló hasta crear un modelo completo, en el que el proceso de desintegración se desencadena por la acción de un nuevo campo de fuerzas, que pronto se conoció como el campo de la fuerza nuclear débil (en contraposición con la fuerza nuclear fuerte). El modelo de Fermi describe cómo, además de la fuerza nuclear fuerte que mantiene juntos a los protones y los neutrones en el núcleo, había también una fuerza débil de corto alcance que podía hacer que el neutrón se desintegrara dando lugar a un protón y un electrón «más» otra partícula sin carga, a la que Fermi llamó «neutrino» (con el diminutivo italiano para referirse a un «neutrón pequeño»), a diferencia de la especulación de Pauli, la de Fermi aportaba un modelo matemático que indicaba claramente cómo se distribuía la energía de los electrones emitida durante la desintegración beta, y concordaba con los experimentos. Incluso así, cuando Fermi envió el informe sobre este trabajo a la revista *Nature* en Londres, dicho informe fue rechazado por considerarse «demasiado especulativo» y finalmente se publicó en una revista italiana. Aunque el informe estaba bien razonado y durante los años siguientes se aportaron pruebas circunstanciales que apoyaban la idea, el neutrino demostró ser tan esquivo que no llegó a detectarse directamente hasta mediados de la década de 1950. Para hacernos una idea del *tour de force* experimental que se organizó, es suficiente que pensemos que, si un haz de neutrinos

atraviesa una pared de plomo de un espesor de 3000 años luz, sólo la mitad de estos neutrinos es capturada por los núcleos de los átomos de plomo que se hallen en su camino.

La identificación del neutrino completa el conjunto de partículas y fuerzas que son responsables del modo en que las cosas se comportan en nuestro entorno cotidiano. Estamos hechos de átomos. Los átomos están hechos de protones, neutrones y electrones. El núcleo contiene protones y neutrones que se mantienen unidos por efecto de la fuerza nuclear fuerte, y en él puede producirse la desintegración beta por efecto de la fuerza nuclear débil (y desde el núcleo, en algunos casos, se emiten partículas alfa como resultado de un reajuste interno de dicho núcleo). Los electrones se encuentran en una nube situada en el exterior del núcleo, que se mantiene por la acción de unas fuerzas electromagnéticas, pero los electrones sólo pueden ocupar determinados niveles de energía, según las reglas de la física cuántica. A gran escala, la gravedad es importante para mantener juntos trozos más grandes de materia. En esta escala menor hemos de preocuparnos por cuatro partículas (el protón, el neutrón, el electrón y el neutrino, más las antipartículas correspondientes que llevan asociadas) y debemos tener en cuenta cuatro fuerzas (la fuerza electromagnética, las fuerzas nucleares fuerte y débil, y la fuerza de la gravedad). Esto es suficiente para explicar todo lo que pueden detectar nuestros sentidos, desde el modo en que brillan las estrellas hasta el proceso de la digestión de alimentos en nuestros cuerpos, desde la explosión de una bomba de hidrógeno hasta el modo en que los cristales de hielo forman copos de nieve.

Electrodinámica cuántica

De hecho, aparte de la gravedad, y de la forma limitada en que la fuerza nuclear débil nos afecta a través de la radioactivi-

dad, casi todo lo que hay en el entorno humano está afectado casi enteramente por la interacción de los electrones entre sí mismos, o con los núcleos de carga positiva de los átomos, y con la radiación electromagnética. Estas interacciones se rigen por las leyes de la mecánica cuántica que se agruparon en una teoría completa de la luz (radiación electromagnética) y la materia en la década de 1940. Dicha teoría se conoce como electrodinámica cuántica, o EDC,[*] y es probablemente la teoría científica que se ha desarrollado con más éxito hasta el momento. En realidad, la EDC fue desarrollada de manera independiente por tres científicos. El primero que consiguió presentar una teoría completa fue Sinitiro Tomonaga (1906-1979), que trabajó primero en condiciones difíciles y luego en condiciones espantosas en Tokio durante y después de la segunda guerra mundial; a causa de estas dificultades, su obra se publicó más tarde de lo normal y coincidió aproximadamente con los informes que describían los trabajos de otros dos pioneros: los estadounidenses Julián Schwinger (1918-1994) y Richard Feynman (1918-1988). Los tres compartieron el Premio Nobel en 1965. Tomonaga y Schwinger trabajaron ambos dentro de lo que se podría llamar en aquella época el marco matemático tradicional de la mecánica cuántica (una tradición que se remontaba a lo sumo a dos décadas), elaborando su teoría directamente a partir de los trabajos que se habían estado realizando desde los primeros avances conseguidos en la década de 1920, y en particular a partir de la obra de Dirac. Feynman utilizó un planteamiento diferente, reinventando la mecánica cuántica prácticamente desde el principio. Sin embargo, todos estos planteamientos eran matemáticamente equivalentes, del mismo modo que las versiones de la mecánica cuántica elaboradas por Fleisenberg-Born-Jordan, Schrödinger y Dirac son todas matemáticamente equivalentes. Pero no es necesario que entremos

en detalles aquí, ya que existe una nítida imagen física que nos puede dar una idea de lo que sucede en estos modelos.

Cuando dos partículas provistas de carga, como serían dos electrones, o un electrón y un protón, actúan recíprocamente, se puede pensar que lo hacen mediante un intercambio de fotones. Dos electrones, por ejemplo, pueden moverse el uno hacia el otro, intercambiar fotones y ser desviados hacia nuevas trayectorias. Es este intercambio de fotones lo que produce la repulsión, que se comporta como siguiendo una ley de la inversa del cuadrado, que emerge de forma natural desde la EDC. Las fuerzas nucleares débil y fuerte se pueden explicar de una manera similar en términos de intercambio de partículas parecidas al fotón (esta explicación de la fuerza débil ha te nido tanto éxito que se ha incorporado actualmente al electromagnetismo para formar un modelo específico, llamado interacción electrodébil; la explicación de la fuerza nuclear fuerte ha tenido un éxito algo menos clamoroso), y se cree que la gravedad también podría explicarse mediante el intercambio de unas partículas llamadas gravitones, aunque todavía no se ha desarrollado un modelo completo para la gravedad cuántica. Sin embargo, es posible hacerse una idea de la precisión de la electrodinámica cuántica en sí misma observando tan sólo una propiedad del electrón, llamada momento magnético.[19] En una versión inicial de la EDC elaborada por Dirac a finales de la década de 1920, eligiendo adecuadamente las unidades, para esta propiedad se predice un valor igual a 1. Con las mismas unidades, ciertos experimentos dan para el momento magnético del electrón un valor de 1,00115965 221, con una incertidumbre o error de ± 4 en el último dígito. Estas predicciones son ya en sí mismas un logro considerable, que en la década de 1930 convenció a los físicos de que la EDC iba por el camino correcto. Sin embargo, la versión final de la EDC predice un valor de 1,00115965 246, con una incertidumbre de ± 20 en los últimos

dígitos. La concordancia entre la teoría y la comprobación experimental es del 0,00000 001 por 100, una diferencia que, como a Feynman le gustaba decir, es equivalente a medir la distancia desde Nueva York hasta Los Ángeles con un error igual al diámetro de un pelo humano. Se trata, con mucho, de la concordancia más precisa entre la teoría y la comprobación experimental que se haya dado en ningún experimento realizado en la Tierra,[20] y es un ejemplo auténtico de cómo la ciencia puede explicar muy bien el comportamiento del mundo físico en el que vivimos nuestras vidas cotidianas, y de lo lejos que hemos llegado desde que Galileo y Newton comenzaron a comparar la teoría con la observación y los experimentos de un modo realmente científico.

¿El futuro? Quarks y cuerdas

En la segunda mitad del siglo XX, cuando los físicos realizaban comprobaciones en el interior de los núcleos e investigaban fenómenos de alta energía utilizando unos gigantescos aceleradores de partículas, descubrieron todo un mundo de partículas subatómicas. Justo en el primer nivel de este nuevo mundo, vieron la posibilidad de considerar que los protones y los neutrones están formados por unas partículas llamadas quarks, que se mantienen unidas por el intercambio de unas entidades análogas a los fotones, y que la fuerza nuclear fuerte no es más que una manifestación externa de la actuación de esta fuerza más profunda. A principios del siglo XXI, en virtud de las evidencias obtenidas, muchos físicos están convencidos de que todas estas «partículas» pueden entenderse mejor como manifestaciones de unos niveles aún más profundos de actividad en los que habría unos diminutos bucles de «cuerdas» vibrantes. Pero es demasiado pronto para poder escribir la historia completa de todos estos trabajos, y parece más apropiado

terminar este relato concreto al nivel de núcleos y átomos —que en realidad sigue siendo el nivel más profundo que tiene un impacto en lo relativo a nuestra vida cotidiana—. En particular, como veremos en el próximo capítulo, es todo lo que necesitamos para explicar de qué modo actúa la vida.

Capítulo 14

EL ÁMBITO DE LA VIDA

LOS OBJETOS MÁS COMPLEJOS DEL UNIVERSO

Entre todo lo que conocemos del universo, nosotros mismos somos lo más complicado. Esto se debe a que en la escala cósmica de las cosas somos de tamaño mediano. Como ya hemos visto, los objetos pequeños, como los átomos, están formados por unos pocos componentes simples que obedecen unas pocas leyes sencillas. Como veremos en el próximo capítulo, el universo completo es tan grande que se pueden ignorar las sutilezas de objetos tan grandes como las estrellas, y el cosmos en su totalidad se puede considerar como un objeto único formado por una distribución razonablemente continua de masa-energía, que a su vez cumple unas pocas leyes muy sencillas. Sin embargo, a una escala a la que los átomos pueden unirse para formar moléculas, aunque las leyes sean también muy simples, el número de compuestos posibles —el número de distintas maneras en que los átomos pueden unirse para formar moléculas— es tan grande que puede existir una enorme variedad de cosas diferentes que tienen estructuras complicadas y que pueden dar lugar a interacciones unas con otras de maneras sutiles. La vida tal como la conocemos es una manifestación de esta capacidad que poseen los átomos para formar una compleja variedad de moléculas grandes. Esta complejidad comienza en la escala siguiente a la de los átomos, con moléculas sencillas tales como el agua y el anhídrido carbónico; termina donde las mo-

léculas empiezan a aplastarse y dejar de existir a causa de la gravedad, cuando se trata del interior de objetos que tienen el tamaño de los grandes planetas, e incluso los átomos se pueden ver totalmente despojados de sus electrones, si pensamos en objetos del tamaño de las estrellas.

El tamaño exacto del trozo de materia que se necesita para destruir la complejidad de la que depende la vida, tal como la conocemos, está determinado por las diferentes intensidades de las fuerzas electromagnética y gravitatoria. Las fuerzas eléctricas que mantienen juntas a las moléculas son 10^{36} veces más fuertes que las fuerzas gravitatorias que intentan aplastar a las moléculas y acabar con su existencia en un trozo de materia. Cuando los átomos están juntos en un trozo de materia, no hay una carga eléctrica global, porque cada átomo es eléctricamente neutro. Por lo tanto, cada átomo actúa prácticamente por su cuenta cuando resiste frente a la gravedad mediante la fuerza de la electrodinámica cuántica. Pero, la intensidad de la fuerza gravitatoria que actúa hacia dentro en cada átomo del trozo de materia aumenta cada vez que se añade un nuevo átomo a dicho trozo de materia. La cantidad de masa que hay en una esfera de una cierta densidad es proporcional al cubo del radio (cuando la densidad es constante), pero la intensidad de la fuerza gravitatoria va disminuyendo según una ley del inverso del cuadrado, por lo que con respecto al radio de un trozo de materia, la gravedad que se manifiesta en la superficie «gana terreno» a las fuerzas eléctricas según una potencia de exponente dos tercios. Esto significa que, dado que 36 es los dos tercios de 54, cuando 10^{36} átomos están juntos en un solo trozo de materia, la gravedad predomina y las moléculas complicadas se rompen y se disgregan.

Supongamos que partimos de un conjunto de objetos formados respectivamente por 10 átomos, 100 átomos, 1000 átomos, y así uno tras otro, de tal forma que cada trozo contiene 10 ve-

ces el número de átomos del anterior. El vigesimocuarto objeto será tan grande como un terrón de azúcar, el vigesimoséptimo tendrá aproximadamente el tamaño de un gran mamífero, el quincuagésimo cuarto será del tamaño del planeta Júpiter y el quincuagésimo séptimo será aproximadamente tan grande como el Sol, donde incluso los átomos son destruidos por la gravedad, dejando una mezcla de núcleos y electrones libres llamada plasma. En esta escala logarítmica, el tamaño de los seres humanos está casi exactamente a medio camino entre los átomos y las estrellas. El objeto trigésimo noveno de este conjunto sería equivalente a una roca de aproximadamente un kilómetro de diámetro, y el dominio de las formas vivas, al que nosotros pertenecemos, se podría situar razonablemente entre el tamaño de los terrones de azúcar y los de las rocas grandes. Este es más o menos el dominio que investigaron Charles Darwin y sus sucesores al desarrollar la teoría de la evolución por selección natural. Sin embargo, la base de la complejidad de la vida que vemos a nuestro alrededor a estas escalas depende de los procesos químicos que tienen lugar en un nivel un poco más profundo, donde, como sabemos actualmente, el ADN es el componente clave de la vida. La historia del proceso que culminó en la identificación del ADN como la clave de la vida es la segunda gran historia de la ciencia del siglo XX y, como la historia de la física cuántica, comenzó casi exactamente con el amanecer del nuevo siglo, aunque en este último caso había existido un precursor de los nuevos descubrimientos que había sido ignorado.

Charles Darwin y las teorías de la evolución en el siglo XIX

Desde los tiempos del gran debate provocado por la publicación de *El origen de las especies* en 1859, el conocimiento del proceso de evolución por selección natural tuvo durante el res-

to del siglo XIX, en el mejor de los casos, un momento destacado, pero se puede decir que luego hubo un retroceso. Una de las razones, ya mencionada aquí, fue el problema de la escala de tiempo necesaria para la evolución. Este problema no se resolvió hasta el siglo XX, y su resolución sólo fue posible gracias al conocimiento de la radioactividad. Sin embargo, aunque Darwin (y otros) defendieron la necesidad de una larga escala de tiempo para que se produjera la evolución, la fuerza de las argumentaciones alegadas por los físicos (en particular William Thomson/lord Kelvin) puso incluso a Darwin a la defensiva. Otra razón, aún más importante, fue que Darwin y sus contemporáneos no conocían el mecanismo mediante el cual las características de una generación pasan a la siguiente —el mecanismo de la herencia—. Este mecanismo tampoco quedó claro hasta bien entrado el siglo XX.

La presentación de las ideas personales de Darwin sobre la herencia se hizo por primera vez en 1868, en un capítulo incluido al final de su libro *Variation of Animals and Plants under Domestication*; estas ideas reflejaban el modo en que pensaban muchos biólogos de la época, aunque era Darwin el que ofrecía el modelo más completo, al que dio el nombre de «pangénesis», del griego «pan», para indicar que todas las células del cuerpo contribuían a la herencia, y con la palabra «génesis» para evocar la idea de reproducción. Según su teoría, cada una de las células del cuerpo contribuye con unas partículas diminutas a las que llamó «gemmules», que son transportadas por todo el cuerpo y se almacenan en las células reproductoras, óvulos o espermatozoides, para ser trasladadas a la generación siguiente. Su modelo incorporaba también la idea de herencia combinada, que dice que cuando dos individuos se asocian para producir su descendencia, esta descendencia es una combinación de las características de los progenitores. Desde un punto de vista moderno, resulta asombroso ver al propio Charles Darwin

promocionando esta idea, que implica que, por ejemplo, los hijos de una mujer alta y un hombre bajo alcanzarían una altura intermedia. Esto está completamente en contra del principio básico de la evolución por selección natural: dicho principio es la exigencia de variación entre los individuos para que se produzca la selección, ya que la herencia combinada produciría al cabo de unas pocas generaciones una población uniforme. El hecho de que Darwin llegara tan siquiera a barajar semejante idea muestra lo lejos que estaban en aquellos tiempos los biólogos de tener un conocimiento verdadero sobre lo que era la herencia. Es en este contexto en el que vemos que las numerosas revisiones que hizo Darwin de *El origen de las especies* tendían cada vez más hacia la postura de Lamarck, mientras sus contrarios argumentaban que la evolución no podía producirse mediante aquella serie de pequeños pasos que se planteaba en la versión original de la selección natural, porque no serían viables las formas intermedias (tales como una protojirafa con un cuello más largo que el de un ciervo, pero demasiado corto para ramonear en las copas de los árboles).[1] Los críticos de Darwin, como el inglés de flamante nombre St George Jackson Mivart (1827-1900), sugirieron que la evolución requería que de una generación a la siguiente se produjeran cambios repentinos en la estructura del cuerpo, siendo en efecto posible que un ciervo fuera padre de una jirafa. Pero tampoco conocían los mecanismos que podían poner en marcha este proceso (excepto la mano de Dios), mientras que Darwin al menos iba por el camino correcto cuando destacó la importancia de cada una de las células en la reproducción, e incluso cuando formuló su teoría de que las células reproductoras contenían unas «partículas» diminutas que transportaban la información de una generación a la siguiente.

EL PAPEL DE LAS CÉLULAS EN LOS PROCESOS VITALES: LA DIVISIÓN

El papel de las células como componentes fundamentales de los seres vivos no empezó a clarificarse hasta finales de la década de 1850, justo cuando Darwin presentó su teoría de la evolución por selección natural ante una amplia audiencia. Esta constatación se debió en gran medida a la mejora de los instrumentos de microscopía y las técnicas de observación. Matthias Schleiden (1804-1881) planteó en 1838 la idea de que todos los tejidos vegetales están formados por células y, un año más tarde, Theodor Schwann (1810-1882) amplió esta teoría a los animales, sugiriendo que todos los seres vivos están compuestos por células. Esto llevó a la idea [planteada, entre otros, por John Goodsir (1814-1867)] de que las células sólo pueden surgir a partir de otras células, por división de éstas, y fue esta explicación la que asumió Rudolf Virchow (1821-1902) como punto de partida y la desarrolló en un libro, *Die Cellularpathologie*, publicado en 1858. Virchow, que entonces era profesor de patología en Berlín, afirmó explícitamente que «toda célula se deriva de una célula preexistente», y aplicó esta doctrina en su propio campo, el de la medicina, sugiriendo que la enfermedad no es más que la respuesta de una célula (o células) ante unas condiciones anormales. En particular, demostró que los tumores se producen a partir de células que existen con anterioridad en el cuerpo. Esta idea resultó enormemente fructífera en muchos aspectos y desencadenó un explosión de interés por el estudio de las células; sin embargo, Virchow puso todos los huevos teóricos en una misma cesta y se opuso radicalmente a la teoría de la infección por «gérmenes» (también rechazó la teoría de la evolución por selección natural). A causa de esta actitud, aunque realizó muchas contribuciones importantes a la medicina, prestó servicios en el Reichstag o Parlamento alemán (donde formó parte de la oposición a Otto von Bismarck) y trabajó en las excavaciones arqueológicas que llevaron a descubrir el emplazamiento de la Troya de Homero en 1879, sin embargo no

realizó más contribuciones directas a la historia que estamos relatando aquí.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS CROMOSOMAS Y SU PAPEL EN LA HERENCIA

Las técnicas microscópicas de que se disponía en la época eran más que adecuadas para mostrar la estructura de la célula como una bolsa llena de una sustancia gelatinosa y acuosa con una concentración de materia en el centro. Esta concentración central se denominó núcleo. De hecho, estas técnicas microscópicas eran tan buenas que, a finales de la década de 1870, Hermann Fol (1845-1892) y Oskar Hertwig (1849-1922), cada uno por su lado, observaron la penetración del espermatozoide en el óvulo (trabajaron con erizos de mar, que tenían la valiosísima propiedad de ser transparentes) y vieron cómo dos núcleos se fusionaban para formar un solo núcleo nuevo, combinando el material proporcionado por ambos progenitores, es decir, heredado de éstos. En 1879, otro alemán, Walther Flemming (1843-1915), descubrió que el núcleo contiene unas estructuras filamentosas que absorben inmediatamente las tinturas coloreadas que utilizan los microscopistas para teñir las células y destacar su estructura; a estos filamentos se le dio el nombre de cromosomas. En la década de 1880, Flemming y el belga Edouard van Beneden (1846-1910) observaron, independientemente el uno del otro, el modo en que los cromosomas se duplicaban y se repartían entre las dos células hijas cuando una célula se dividía. August Weismann (1834-1914), cuando trabajaba en la Universidad de Friburgo, retomó esta línea de estudio en la década de 1880. Fue Weismann quien indicó que los cromosomas eran los portadores de la información hereditaria, afirmando que «la herencia se lleva a cabo mediante la transmisión de una generación a otra de una sustancia que tiene una

constitución química y, sobre todo, molecular claramente definida».[2] Dio a esta sustancia el nombre de «cromatina» y describió los dos tipos de división celular que se producen en especies como la nuestra. Cuando se realiza el tipo de división celular que está asociado con el crecimiento y el desarrollo, todos los cromosomas de la célula se duplican antes de que ésta se divida, de tal forma que cada célula hija recibe una copia del conjunto original de cromosomas; durante el tipo de división celular que da lugar al óvulo o a los espermatozoides, la cantidad de cromatina se divide en dos partes iguales, de tal forma que sólo se recupera un conjunto completo de cromosomas cuando dos de estas células se fusionan para crear la célula potencial que dará lugar al desarrollo de un nuevo individuo.[3] Fue Weismann quien demostró, durante los primeros años del siglo XX, que las células responsables de la reproducción no están implicadas en otros procesos que tienen lugar en el cuerpo, y las células que forman el resto del cuerpo no están implicadas en la fabricación de células reproductoras, por lo que la teoría de la pangénesis de Darwin es definitivamente falsa, y por otra parte, se podía descartar la teoría de Lamarck, según la cual hay influencias exteriores procedentes del entorno que causan directamente variaciones de una generación a otra (aunque esto no impidió a los lamarckianos continuar defendiendo sus tesis hasta bien entrado el siglo XX). El descubrimiento posterior de que la radiación puede causar lo que actualmente conocemos como mutaciones, por daños producidos directamente en el ADN de las células reproductoras, no reduce en absoluto el poder de los argumentos de Weismann, ya que estos cambios aleatorios son casi invariablemente perjudiciales y, ciertamente, no contribuyen a que los descendientes de los organismos afectados se adapten mejor a su entorno.

La pangénesis intracelular

Aproximadamente al mismo tiempo que Weismann realizaba pruebas en el interior de la célula para identificar las sustancias químicas portadoras de la herencia, el botánico holandés Hugo de Vries (1848-1935) trabajaba con plantas enteras para averiguar el modo en que las características se transmitían de una generación a la siguiente. En 1889, sólo siete años después de la muerte de Darwin, De Vries publicó un libro, titulado *La pangénesis intracelular*, en el que intentaba adaptar las teorías de Darwin a la imagen del funcionamiento de las células que entonces estaba comenzando a esbozarse. Combinando esto con observaciones relativas al modo en que actúa la herencia en las plantas, De Vries sugirió que las características de una especie debían estar formadas por un gran número de unidades distintas, ligada cada una de ellas a un solo factor hereditario que se transmitía de una generación a la siguiente con mayor o menor independencia de los demás factores. Dio a los factores hereditarios el nombre de «pangenes», derivado del término pangénesis acuñado por Darwin; después de los estudios realizados por Weismann (y otros), que demostraban que no es el cuerpo en su totalidad el que participa en la producción de estos factores hereditarios, se suprimió tranquilamente el «pan», quedando el término moderno «gen», que ahora nos resulta tan familiar y que fue utilizado por primera vez por el danés Wilhelm Johannsen en 1909.

Gregor Mendel: el padre de la genética

En la década de 1890, De Vries llevó a cabo una serie de experimentos mediante el cultivo de plantas, en los que registró meticulosamente el modo en que se podía seguir la pista a las características particulares a través de las generaciones (características tales como la altura de una planta o el color de sus flores). Al mismo tiempo, en Inglaterra, se publicaron estudios

similares realizados por William Bateson (1861-1926), quien posteriormente acuñó el término «genética» para referirse al estudio del modo en que funciona la herencia. En 1899, De Vries estaba ya en condiciones de preparar la publicación de su obra y, mientras lo hacía, realizó un repaso de la literatura científica con el fin de situar sus conclusiones en el contexto adecuado. Fue entonces cuando descubrió que casi todas las conclusiones a las que había llegado en relación con la herencia ya habían sido publicadas en dos informes, poco leídos y menos frecuentemente citados, de un monje moravo llamado Gregor Mendel. En realidad, el propio Mendel había explicado su obra en dos informes que leyó ante la Sociedad de Ciencias Naturales en Brünn (que actualmente se llama Brno y está en la República Checa) el año 1865 y que publicó un año más tarde en las actas de esta sociedad. Es fácil imaginarse cómo se sintió De Vries cuando hizo este descubrimiento. Sin embargo, quizá con una cierta falta de sinceridad, publicó sus propios hallazgos en dos informes que aparecieron a principios de 1900: el primero de ellos, en francés, no mencionaba a Mendel, pero el segundo, publicado en alemán, reconoce casi plenamente los méritos de su predecesor, comentando que «el hecho de que esta importante monografía se cite sólo en raras ocasiones hizo que yo mismo no tuviera conocimiento de ella hasta haber terminado la mayoría de mis experimentos y haber deducido por mi cuenta, de manera independiente, las cuestiones anteriormente mencionadas»,[4] y resumiendo:

> A partir de éste y de otros muchos experimentos saqué la conclusión de que la ley de segregación de híbridos, tal como la descubrió Mendel para los guisantes, tiene una aplicación muy general en el reino vegetal y una importancia básica para el estudio de las unidades de que se compone el carácter de la especie.

Estaba claro que se trataba de una teoría cuyo momento había llegado. En Alemania, Karl Correns (1864-1933), mientras trabajaba siguiendo una línea similar, había encontrado tam-

bién recientemente los informes de Mendel y, cuando estaba preparando su propia obra para que fuese publicada, recibió una copia del informe en francés escrito por De Vries. Además, en Austria, Erich Tschermak von Seysenegg sufrió un percance similar.[5] El resultado global fue que pronto quedó firmemente establecida la base genética de la herencia, y cada uno de los tres redescubridores de los principios básicos de la herencia, reconocieron a Mendel sus méritos en la forma debida, como auténtico descubridor de las leyes de la herencia. Desde luego esto fue así, pero el rápido reconocimiento de la prioridad de Mendel no ha de ser considerado únicamente como un acto de generosidad desinteresada —después de todo, siendo tres científicos los que reclamaban el «descubrimiento» en 1900, a cada uno de ellos le convenía reconocer la obra de un predecesor ya fallecido, en vez de entrar en discusiones entre ellos sobre quién había hecho el trabajo primero. No obstante, de estos hechos se puede extraer una lección histórica importante. Varias personas hicieron, con independencia mutua, unos descubrimientos similares a finales de la década de 1890 porque era el momento oportuno y estaba hecho el trabajo básico de identificación del núcleo y el descubrimiento de los cromosomas. Recordemos que el núcleo no se identificó hasta el mismo año, 1858, en que se leyó el informe conjunto de Darwin y Wallace en la Linnean Society, mientras que los resultados de Mendel se publicaron en 1866. Fue un trabajo inspirado, pero se adelantaba a su tiempo, y no se entendió el sentido que tenía hasta que los científicos hubieron visto realmente dentro de la célula los «factores de la herencia» y el modo en que se separaban y recombinaban para formar nuevos paquetes de información genética. Sin embargo, aunque la obra de Mendel no tuvo de hecho, según parece, ninguna influencia en absoluto Sobre el desarrollo de la ciencia biológica en la segunda mitad del siglo XIX, vale la pena echar un rápido vistazo a las cosas que hi-

zo, tanto para rebatir algunas ideas falsas que se han divulgado sobre este hombre, como para poner de relieve el aspecto realmente importante de su obra, que a menudo se pasa por alto.



37. Gregor Mendel, 1880.

Mendel no era un horticultor rural con hábitos de monje que tuvo un día la suerte de descubrir algo. Tenía una formación científica y sabía exactamente qué estaba haciendo; fue además uno de los primeros que aplicaron el riguroso método de las ciencias físicas a la biología. Nació el 22 de julio de 1822 en Heinzendorf, Moravia, que entonces formaba parte del Imperio austríaco, y fue bautizado con el nombre de Johann, aunque luego adoptó el de Gregor al entrar en una orden religiosa.

Está claro que Mendel fue un niño extraordinariamente inteligente, pero procedía de una familia de granjeros pobres, que agotó todos sus recursos económicos para enviar al brillante joven a un centro de enseñanza secundaria (*Gymnasium*) y a cursar unos estudios de dos años en el Instituto Filosófico de Olmütz, con intención de prepararle para la universidad. Pero, dado que este último tramo formativo estaba más allá de sus posibilidades económicas, en 1843 Mendel se hizo sacerdote como único medio para continuar sus estudios, tras haber sido recomendado por un cazatalentos, el abad del monasterio de Santo Tomás de Brünn (Brno). Este abad, Cyrill Franz Napp, había emprendido la tarea de convertir el monasterio en un centro intelectual de primer orden, donde entre los monjes había un botánico, un astrónomo, un filósofo y un compositor, todos ellos con una extraordinaria reputación fuera de los muros del monasterio. El abad Napp estaba ansioso por añadir a su comunidad más pensadores, reclutando jóvenes brillantes dotados de capacidad, pero sin otras posibilidades que entrar en una orden religiosa. El abad conoció a Mendel cuando se lo presentó el profesor de física que le había dado clases al muchacho en Olmütz, un profesor que había trabajado anteriormente en Brünn. Mendel terminó sus estudios de teología en 1848 y trabajó como profesor suplente en el *Gymnasium* de la localidad y posteriormente en la escuela técnica, aunque, a causa de los graves trastornos que le producían sus nervios cuando iba a examinarse, suspendió repetidamente los exámenes que le hubieran permitido regularizar su posición.

Mendel demostró tal capacidad que, en 1851, a los 29 años de edad, fue enviado a estudiar a la Universidad de Viena, donde Christian Doppler era catedrático de física (por situar la época en otro contexto relevante en Viena, Johann Strauss hijo tenía 26 años en 1851). Sólo se le permitió ausentarse del monasterio durante dos años para tener esta privilegiada oportu-

nidad, pero Mendel simultaneó en aquella época estudios de física experimental, estadística y probabilidad, la teoría atómica de la física y fisiología vegetal, entre otras cosas. No obtuvo licenciatura alguna —eso no entraba en los planes del abad— pero regresó a Brünn mejor preparado que nunca para desempeñar su tarea docente. Sin embargo, esto no era suficiente para saciar su sed de conocimientos científicos. En 1856, Mendel comenzó tina investigación exhaustiva sobre el modo en que actúa la herencia en los guisantes,[6] llevando a cabo durante siete años unos experimentos esmerados y precisos que le llevaron a descubrir el modo en que funciona la herencia. Disponía de una parcela de tierra de 33 metros de longitud por 7 metros de ancho en el huerto del monasterio, además de un invernadero y todo el tiempo libre que podía robar de sus deberes docentes y religiosos. Trabajó con unas 28 000 plantas, de las cuales 12 835 estaban sometidas a una observación meticulosa. Cada planta estaba identificada individualmente y sus descendientes estaban registrados como en un árbol familiar, marcando esto un contraste claro con el modo en que habían trabajado los biólogos anteriormente, plantando variedades «en masa» e intentando sacar alguna consecuencia lógica de la confusión de híbridos que daban como resultado los experimentos (o se limitaban sencillamente a estudiar las plantas en estado silvestre). Entre otras cosas, esto significaba que Mendel tenía que polinizar a mano cada una de sus plantas experimentales, espolvoreando polen de una única planta determinada en las flores de otra única planta determinada, y también llevaba un registro donde anotaba minuciosamente lo que hacía.



38. Diagrama que muestra plantas de guisantes y que ilustra un aspecto del trabajo de Mendel sobre la herencia genética.

La clave de la obra de Mendel —el aspecto que a menudo se pasa por alto— es que trabajaba como un físico, realizando experimentos repetibles y, lo más importante, aplicando métodos estadísticos adecuados al análisis de los resultados, tal como le habían enseñado en Viena. Lo que su trabajo demostraba era que en una planta había algo que determinaba las características de su forma global. Podríamos llamar a ese algo por su nombre moderno: gen. Los genes se presentan a pares, de tal manera que (en uno de los ejemplos estudiados por Mendel) hay un gen L que da como resultado semillas lisas, y otro gen R, cuyo resultado son semillas rugosas, pero una planta determinada llevará una de las combinaciones posibles: LL, RR o LR. Sin embargo, sólo uno de los genes del par se reflejará en el tipo de semilla (en lo que se llama el «fenotipo»). Si la planta lleva LL o RR, no tiene más opción que utilizar el gen apropiado y producir semillas lisas o rugosas, según el caso. Pero si lleva la combinación LR, se podría esperar que la mitad de las plantas produjera semillas rugosas y la otra mitad semillas lisas, pero no es así. El gen R queda ignorado y sólo el gen L se manifiesta en el fenotipo. En este caso, se dice que L es dominante y R es recesivo. Mendel dedujo todo esto a partir de las estadísticas, que en este caso parten de observar que, cuando las plantas RR (es decir, las plantas que siempre producen semillas rugosas) se cruzan con plantas LL (las que siempre producen semillas lisas), el 75 por 100 de la descendencia tiene semillas lisas y sólo un 25 por 100 tiene semillas rugosas. Por supuesto, la razón es hay dos modos de conseguir descendencia RL (RL y LR) que son equivalentes. Consecuentemente, en la generación siguiente, los individuos se distribuyen equitativamente en cuatro genotipos: RR, RL, LR y LL, de los cuales sólo los RR tendrán semillas

rugosas. Sólo observando la primera generación, aunque Mendel realizó las estadísticas llegando hasta los «nietos» y más allá, éste es el ejemplo más sencillo del tipo de análisis que Mendel aplicó en sus estudios (y luego lo hicieron De Vries, Bateson, Correns, Von Seysenegg y muchos otros). Mendel había demostrado de forma concluyente que la herencia no funciona mezclando las características de los dos progenitores, sino tomando características individuales de cada uno de ellos. A principios de la década de 1900, a partir de la obra de científicos como William Sutton en la Universidad de Columbia, quedó claro que son los cromosomas los que transportan los genes, y que los cromosomas se presentan en pares, con un cromosoma heredado de cada progenitor. En el tipo de división celular que produce las células sexuales, estos pares se separan, pero (según sabemos actualmente) después de que en los cromosomas emparejados se produzca el corte de trozos de material que luego se intercambian entre sí, haciendo que nuevas combinaciones de genes pasen a la generación siguiente.

Los descubrimientos de Mendel fueron presentados en la Sociedad de Ciencias Naturales de Brünn, ante una audiencia bastante desconcertada (pocos biólogos entendían algo de estadística en aquellos tiempos), en 1865, cuando Mendel tenía 42 años de edad. Estos informes fueron enviados a otros biólogos, con los cuales Mendel mantenía correspondencia, pero en aquella época nadie supo apreciar su importancia. Quizá Mendel podría haber promocionado su obra más activamente para asegurarse de que se le prestaba más atención; sin embargo, en 1868 Cyrill Franz Napp falleció y Gregor Johann Mendel fue elegido para sucederle como abad. Sus nuevas obligaciones le dejaban poco tiempo para dedicarse a la ciencia y su programa experimental de cultivo de plantas quedó prácticamente abandonado cuando su promotor tenía 46 años, aunque vivió hasta el 6 de enero de 1884.

El redescubrimiento de las leyes de la herencia de Mendel a principios del siglo XX, combinado con la identificación de los cromosomas, proporcionó las claves para comprender cómo funciona la evolución a nivel molecular. El siguiente paso importante lo dio el estadounidense Thomas Hunt Morgan, que nació en Lexington, Kentucky, el 25 de septiembre de 1866 y llegó a ser catedrático de zoología en la Universidad de Columbia en 1904. Morgan descendía de una familia prominente —uno de sus abuelos fue Francis Scott Key, que escribió el himno nacional de Estados Unidos; su padre prestó servicios durante cierto tiempo como cónsul de Estados Unidos en Messina, Sicilia; y uno de sus tíos había sido coronel en el ejército confederado—. Del mismo modo que Robert Millikan era escéptico con respecto a las teorías de Einstein relativas al efecto fotoeléctrico (y a otro brillante ejemplo de cómo funciona el método científico), Morgan tenía dudas con respecto a todo el asunto de la herencia mendeliana, unas dudas que se basaban en la idea de que los supuestos «factores» pasaban de una generación a la siguiente. Existía la posibilidad de que dichos factores pudieran ser transmitidos por los cromosomas, pero Morgan no estaba convencido y comenzó a realizar una serie de experimentos que le llevarían a recibir en 1933 el Premio Nobel. El objetivo que perseguía con estos experimentos era probar que las sencillas leyes descubiertas por Mendel constituían como mucho un caso especial, siendo aplicables sólo a unas pocas características simples de algunas plantas en particular, sin que fuera posible una aplicación general al mundo de los seres vivos.

EL ESTUDIO DE LOS CROMOSOMAS

El organismo que Morgan eligió para sus trabajos fue la diminuta mosca de la fruta, la drosofila (género *Drosophila*). Este nombre significa «amante del rocío», pero son en realidad las

sustancias en fermentación, no el rocío, lo que atrae a estas moscas a la fruta que se está pudriendo. A pesar de las dificultades obvias que plantea trabajar con insectos en vez de con plantas, la *Drosophila* tiene una gran ventaja para los investigadores de la herencia. Mientras Mendel tenía que esperar durante un año para observar a la siguiente generación de guisantes en cada etapa de su programa de cultivo, las pequeñas moscas (cada una de ellas con una longitud de unos 3 milímetros) producen una nueva generación cada dos semanas y cada hembra pone cientos de huevos de una vez. Sin embargo, fue sólo cuestión de suerte que la *Drosophila* tuviera únicamente cuatro pares de cromosomas, lo que hacía que para Morgan fuera más fácil investigar el modo en los caracteres pasaban de una generación a la siguiente.[7]

En todas las especies que se reproducen sexualmente hay un par de cromosomas que tiene una importancia especial. Aunque los cromosomas individuales tienen ambos un aspecto similar en la mayoría de las parejas de cromosomas, en el par de cromosomas que determinan el sexo hay una diferencia clara en cuanto a la forma de esos cromosomas: precisamente por esas formas se conocen como cromosoma X y cromosoma Y. Podríamos pensar que existen tres combinaciones posibles que pueden presentarse en un individuo: XX, XY e YY. Sin embargo, en las hembras las células siempre tienen el par XX, mientras que en los machos la combinación es XY.[8] Por lo tanto, un individuo nuevo debe heredar un cromosoma X de su madre, y puede heredar el cromosoma X o el y de su padre; si hereda un cromosoma X de su padre, será hembra; si hereda un cromosoma Y, será macho. La cuestión es que Morgan descubrió una variedad de moscas, entre sus drosofilas, que tenían ojos blancos en vez de los habituales ojos rojos. Un meticuloso programa de reproducción y el análisis estadístico de los resultados demostró que el gen (un término que Morgan adoptó y promo-

cionó) responsable del color de los ojos del insecto tenía que estar en el cromosoma X y que era recesivo. En los machos, si el gen de esta variante (la diferentes variedades de un gen determinado se llaman alelos) estaba presente en su único cromosoma X, entonces tenían los ojos blancos. Pero, en la hembra, el alelo en cuestión tenía que estar presente en los dos cromosomas X para que la característica de los ojos blancos apareciera en el fenotipo.

Este primer resultado animó a Morgan a seguir con su trabajo en la segunda década del siglo XX, en colaboración con un equipo de estudiantes de investigación. Los trabajos realizados por este equipo pusieron de manifiesto que los cromosomas llevan una colección de genes como si fueran cuentas ensartadas en un cable y que, durante el proceso de producción de espermatozoides o de óvulos, los cromosomas de cada pareja se parten y se vuelven a unir formando nuevas combinaciones de alelos. Los genes que están alejados unos de otros dentro del cromosoma tienen una probabilidad mayor de quedar separados cuando se produce este proceso de cruce y recombinación, mientras que los genes que están cerca dentro del cromosoma rara vez se separan; este experimento de Morgan, y muchos otros trabajos realizados con gran esmero, proporcionaron la base para establecer el orden de los genes a lo largo del cromosoma. Aunque todavía quedaban por hacer una gran cantidad de trabajos de este tipo —y se haría utilizando la tecnología perfeccionada de que se disponía a finales del siglo XX—, la época en que la herencia mendeliana y la genética alcanzaron en conjunto, por fin, su mayoría de edad puede situarse en 1915, cuando Morgan y sus colegas A. H. Sturtevant, C. B. Bridges y H. J. Muller publicaron su libro *The Mechanism of Mendelian Heredity*, que se convirtió en un clásico. El propio Morgan escribió a continuación *The Theory of the Gene* (1926), se trasladó a Caltech en 1928, recibió el Premio Nobel en 1933 y

falleció en Corona del Mar, California, el 4 de diciembre de 1945.

La evolución por selección natural sólo funciona si existe una variedad de individuos a partir de los cuales se puede hacer la selección. Por lo tanto, la teoría desarrollada por Morgan y sus colegas —en la que se afirma que la constante reorganización de las posibilidades genéticas dentro del proceso de reproducción favorece la diversidad explica también por qué para las especies que se reproducen sexualmente es tan fácil adaptarse a los cambios de las condiciones del entorno. Las especies asexuales también evolucionan, pero más lentamente. En los seres humanos, por ejemplo, hay alrededor de 30 000 genes que determinan el fenotipo. Algo más del 93 por 100 de estos genes son homocigotos, lo cual significa que en todos los seres humanos estos genes son los mismos dentro de cada cromosoma del par en cuestión. Sólo menos del 7 por 100 son heterocigotos, lo que significa que hay alguna posibilidad de que existan diferentes alelos para ese gen determinado contenido en los cromosomas emparejados de una persona concreta elegida al azar. Estos alelos diferentes han surgido por un proceso de mutación, del cual hablaremos más tarde, y se encuentran en la reserva genética, pero tienen poco efecto, a menos que supongan una ventaja al aparecer en el fenotipo (las mutaciones perjudiciales no tardan en desaparecer; de esto se trata precisamente en la selección natural). Si hay unos 2000 pares de genes que se presentan al menos en dos variedades (algunos tiene más de dos alelos), esto significa que el número de maneras en que dos individuos pueden ser diferentes el uno del otro es el resultado de hacer 2 elevado a 2000 (2^{2000} maneras). Es un número tan increíblemente grande que incluso los números que se barajan en astronomía (como los que veremos en el próximo capítulo) palidecen al compararlos con él, y la interpretación es no sólo que no hay dos personas en la Tierra que sean genéticamente idénticas

(salvo los gemelos que comparten el mismo genotipo porque proceden de un mismo óvulo fertilizado), sino que no hay dos personas que hayan sido exactamente iguales entre todas las que han vivido hasta la fecha. Esto nos indica en cierto modo lo amplia que es la variedad en la que actúa la selección natural. A partir de 1915, a medida que la naturaleza de los cromosomas, del sexo, de la recombinación y de la herencia fue quedando más clara, la gran pregunta que se iba perfilando era qué sucedía a un nivel más profundo, dentro del núcleo y dentro de los propios cromosomas. Cuando los científicos se pusieron a investigar los secretos de la vida a nivel molecular, el modo de responder a esta pregunta iba a incluir los últimos avances en mecánica cuántica y en química; pero los primeros pasos en el camino que conduciría a la doble hélice del ADN se habían dado ya casi medio siglo antes y con unos procedimientos claramente anticuados.

Los ácidos nucleicos

Los primeros pasos los dio el bioquímico suizo Friedrich Miescher (1844-1895). Su padre (que también se llamaba Friedrich) fue catedrático de anatomía y fisiología en Basilea desde 1837 hasta 1844, antes de trasladarse a Berna, y el tío materno del joven Friedrich, Wilhelm Flis (1831-1904), ocupó la misma cátedra entre 1857 y 1872. Ejerció una influencia especialmente fuerte sobre su sobrino, que sólo era 13 años más joven que él y estudió medicina en Basilea antes de ir a la Universidad de Tubinga, donde estudió química orgánica con Félix Floppe-Seyler (1825-1895) desde 1868 hasta 1869, pasando luego una temporada en Leipzig, antes de regresar a Basilea. En 1872, cuando His se trasladó en sentido inverso, abandonando Basilea para ir a Leipzig, su cátedra se dividió en dos, una de anatomía y otra de fisiología; el joven Miescher consiguió la cátedra

de fisiología, en parte como resultado de un claro nepotismo. Permaneció en el puesto hasta que falleció, de tuberculosis, el 16 de agosto de 1895, justo tres días después de haber cumplido 51 años.

Miescher fue a trabajar a Tubinga porque estaba interesado en investigar la estructura de la célula (un interés que fomentaba su tío y que era algo muy actual en la corriente principal de la investigación biológica que se estaba realizando en aquella época); Hoppe-Seyler no sólo había montado el primer laboratorio dedicado a lo que ahora se llama bioquímica, sino que había sido anteriormente ayudante de Rudolf Virchow, manifestando siempre un vivo interés por el funcionamiento de las células —recordemos que Virchow, apenas diez años antes de que Miescher fuera a Tubinga, había establecido la doctrina según la cual las células vivas son creadas sólo por otras células vivas. Después de discutir las posibilidades de su primer proyecto propio de investigación con Hoppe-Seyler, Miescher emprendió una investigación sobre las células blancas de la sangre humana, conocidas como leucocitos. Desde un punto de vista, si no estético, al menos práctico, estas células ofrecían la gran ventaja de estar disponibles en grandes cantidades, ya que se podían obtener a partir de los vendajes empapados de pus que proporcionaba una clínica quirúrgica situada en las proximidades. Se sabía ya que las proteínas eran las sustancias constitutivas más importantes del cuerpo humano, y se esperaba que la investigación llevada a cabo por Miescher conseguiría identificar las proteínas que participaban en los procesos químicos de la célula y que eran, por consiguiente, la clave de la vida. Tras superar las dificultades que planteaba el lavado de los vendajes para obtener células intactas y sin daños, y sometiéndolas luego a un análisis químico, Miescher pronto descubrió que el citoplasma acuoso que llena el volumen de la célula fuera del núcleo es realmente rico en proteínas; sin embargo, estudios pos-

teriores demostraron que había algo más en las células. Después de retirar todo el material externo y de recoger grandes cantidades de núcleos no dañados y sin resto de citoplasma (algo que nadie había conseguido hasta entonces), Miescher pudo analizar la composición del núcleo y descubrió que presentaba diferencias notables con respecto a la composición de las proteínas. Esta sustancia del núcleo, a la que llamó «nucleína», contiene gran cantidad de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, al igual que otras moléculas orgánicas, pero también descubrió que contenía unas cantidades significativas de fósforo, a diferencia de lo que se encontraba en las demás proteínas. En el verano de 1869, Miescher ya había confirmado que la nueva sustancia procedía de los núcleos de las células y la había identificado, no sólo en los leucocitos del pus, sino también en células de fermentos, en el riñón, en los glóbulos rojos y en otros tejidos.

Cuando se dio a conocer, el descubrimiento de Miescher no causó la gran sensación que podríamos imaginar, de hecho, transcurrió mucho tiempo antes de que alguien, aparte de Hoppe-Seyler, tuviera noticia de ello. En el otoño de 1869 Miescher se trasladó a Leipzig, donde puso sus descubrimientos por escrito y los remitió a Tubinga para que fueran publicados en una revista que editaba Hoppe-Seyler. A éste le resultó difícil creer que aquellos resultados eran ciertos y se dedicó a hacer tiempo mientras dos de sus alumnos realizaban experimentos para confirmarlos. Más tarde, en julio de 1870, comenzó la guerra franco-prusiana y el consiguiente desorden generalizado retrasó la publicación de la revista. El informe apareció publicado finalmente en la primavera de 1871, junto con el trabajo que confirmaba los hallazgos de Miescher y acompañado de una nota de Hoppe-Seyler en la que éste explicaba que la publicación se había retrasado por circunstancias imprevistas. Miescher continuó sus estudios sobre la nucleína después de con-

vertirse en catedrático en Basilea, concentrándose en el análisis de los espermatozoides del salmón. El espermatozoide es casi en su totalidad un núcleo, con tan sólo un vestigio de citoplasma, porque su única finalidad es fusionarse con el núcleo de un óvulo, que es una célula mucho mejor dotada, y aportar material hereditario para la generación siguiente. El salmón produce enormes cantidades de esperma y adelgaza en su viaje hacia las zonas de desove, a medida que parte de su tejido corporal se va convirtiendo en material reproductor. De hecho, Miescher señaló que las proteínas estructurales del cuerpo deben romperse y convertirse así en espermatozoides, siendo importante en sí misma esta constatación de que distintas partes del cuerpo pueden descomponerse para luego recomponerse de otra forma. En el transcurso de este trabajo descubrió que la nucleína era una molécula grande que contenía varios grupos ácidos; fue Richard Altmann, unos de los discípulos de Miescher, quien en 1889 introdujo el término «ácido nucleico» para designar a estas moléculas. Sin embargo, Miescher falleció sin haber llegado a conocer la importancia real de lo que había descubierto.

Como prácticamente todos sus colegas bioquímicos, Miescher no llegó a darse cuenta de que la nucleína podía ser la portadora de la información hereditaria. Estuvieron demasiado cerca de las moléculas para ver una imagen global de la célula en acción, y consideraron que aquellas moléculas aparentemente sencillas eran sólo alguna clase de material estructural, quizás un andamiaje para estructuras proteicas más complicadas. Sin embargo, los biólogos celulares, provistos de las nuevas técnicas de coloración que ponen a la vista los cromosomas, podían ver realmente cómo se compartía el material genético cuando las células se dividían y fueron mucho más rápidos a la hora de darse cuenta de la importancia de la nucleína. En 1885, Oskar Hertwig escribió que «la nucleína, no sólo es la sustancia responsable de la fertilización, sino también de la transmisión

de las características hereditarias»,[9] mientras que, en un libro publicado en 1896,[10] el biólogo estadounidense Edmund Wilson (1856-1939) escribió, de una forma más exagerada, lo siguiente:

> La cromatina ha de considerarse como la base física de la herencia. Ahora bien, se sabe que la cromatina es muy parecida, si no idéntica, a una sustancia conocida como nucleína… un compuesto químico, bastante bien definido, de ácido nucleico (un ácido orgánico complejo y rico en fósforo) y albúmina, y así llegamos a la notable conclusión de que la herencia quizá se efectúe por la transmisión física de un compuesto determinado que pasa de los progenitores a la descendencia.

Pero aún había que recorrer un tortuoso camino antes de que se confirmara la «notable conclusión» de Wilson.

Trabajos orientados hacia el descubrimiento del ADN y el ARN

Conseguir progresos por ese camino dependía de que se identificara la estructura de la nucleína, y los bloques básicos que constituyen las moléculas importantes (aunque no, de momento, los detalles relativos al modo en que los bloques constituyentes se unen entre sí) estuvieron ya todos ellos identificados al cabo de un pocos años después de la muerte de Miescher —algunos incluso antes de que muriera. El bloque constituyente que da su nombre al ADN es la ribosa, un azúcar cuya estructura central consiste en cuatro átomos de carbono unidos con un átomo de oxígeno en un anillo pentagonal, con otros átomos (sobre todo pares hidrógenooxígeno, OH) ligados a los vértices. Estos átomos ligados a los vértices pueden sustituirse por otras moléculas, ligando así las unidades de ribosa a ellas. El segundo bloque constituyente, que se une precisamente de este modo, es un grupo molecular que contiene fósforo y se conoce como grupo fosfato sabemos ahora que estos grupos fosfato actúan como vínculos entre los pentágonos de ribosa en

una cadena alternante. El tercer y último bloque constituyente se presenta en cinco variedades, llamadas «bases», conocidas como guanina, adenina, citosina, timina y uracil, que se suelen mencionar sencillamente mediante sus iniciales: G, A, C, T y U. Posteriormente se descubrió que cada base está unida a cada uno de los anillos de azúcar de la cadena, pegada y sobresaliendo lateralmente. El pentágono de ribosa es el que da su nombre a toda la molécula en su globalidad: ácido ribonucleico o ARN; un tipo casi idéntico de molécula (no identificada hasta finales de la década de 1920) en la que cada unidad de azúcar tiene un átomo de oxígeno menos (H donde la ribosa tiene OH) recibe el nombre de ácido desoxirribonucleico (ADN). La otra diferencia entre el ARN y el ADN es que, aunque cada uno de ellos contiene sólo cuatro de las bases, el ARN contiene G, A, C y U, mientras el ADN contiene G, A, C y T. Fue este descubrimiento el que reforzó la idea de que la nucleína no era más que una molécula estructural y retrasó el desarrollo de un conocimiento adecuado del papel que desempeña con respecto a la herencia.

La hipótesis tetranucleótida

El mayor responsable de este malentendido fue el estadounidense nacido en Rusia Phoebus Levene (1869-1940), que fue miembro fundador del Rockefeller Institute de Nueva York en 1905 y pasó allí el resto de su vida laboral. Desempeñó un papel destacado en la identificación del modo en que estaban unidos entre sí los bloques constituyentes del ARN y fue, de hecho, quien por fin identificó el ADN en 1929; sin embargo, cometió un error incomprensible que, gracias a su prestigio e influencia como bioquímico de primera fila, tuvo desgraciadamente una incidencia muy amplia. Cuando Levene nació (el mismo año en que Miescher descubrió la nucleína) en la pequeña ciudad de

Sagor, Levene recibió el nombre judío de Fishel, que se cambió por el ruso Feodor al trasladarse su familia a San Petersburgo cuando el niño tenía dos años de edad. En 1891, cuando la familia emigró a Estados Unidos para escapar de los últimos pogromos antijudíos, Levene cambió su nombre por el de Phoebus, creyendo equivocadamente que éste era el equivalente en inglés; en el momento en que descubrió que tenía que haber elegido el de Theodore, no parecía ya muy oportuno volver a cambiarlo. La equivocación incomprensible de Levene se produjo como resultado de los análisis de cantidades relativamente grandes de ácido nucleico. Cuando descompuso el ácido nucleico en sus bloques constituyentes para realizar un análisis, resultó que contenía unas cantidades casi iguales de G, A, C y U (las células de fermentos utilizadas en este trabajo producían ARN). Esto le llevó a la conclusión de que el ácido nucleico era una estructura simple formada por cuatro unidades que se repetían, unidas unas a otras del modo que ya hemos explicado; incluso parecía posible que una sola molécula de ARN contuviera sólo una unidad de cada una de las cuatro bases. Este conjunto de ideas llegó a ser conocido como hipótesis tetranucleótida pero en vez de ser tratada como una hipótesis que tenía que comprobarse adecuadamente, se le concedió la categoría de dogma y fue aceptada, más o menos sin cuestionamientos, por un número excesivo de contemporáneos y sucesores inmediatos de Levene. Puesto que se sabía que las proteínas eran unas moléculas muy complicadas formadas por una gran variedad de aminoácidos unidos entre sí de distintas maneras, adquiría cada vez mayor fuerza la idea de que toda la información importante de la célula estaba contenida en la estructura de las proteínas y que los ácidos nucleicos proporcionaban simplemente una sencilla estructura de soporte que mantenía a las proteínas en su sitio. Después de todo, hay muy poca información en un mensaje que contiene sólo una palabra, GACU, re-

petida infinitas veces. Sin embargo, hacia finales de la década de 1920, empezaban a surgir pruebas evidentes que llevarían al conocimiento de que los ácidos nucleicos son algo más que un andamiaje. El primer indicio apareció en 1928, un año antes de que Levene identificara finalmente el ADN.

La clave surgió a partir de los trabajos de Fred Griffith (1881-1941), un microbiólogo británico que trabajaba como médico militar para el Ministerio de Sanidad en Londres. Estaba investigando la bacteria que causa la neumonía, sin intención alguna de indagar en las verdades profundas relativas a la herencia. Pero, del mismo modo que las moscas de la fruta se reproducen más rápido que las plantas de los guisantes y por consiguiente, en circunstancias adecuadas, muestran con mayor rapidez cómo funciona la herencia, asimismo microorganismos tales como las bacterias se reproducen a mayor velocidad que las moscas de la fruta, produciéndose varias generaciones en cuestión de horas, y pueden mostrar en unas cuantas semanas el tipo de cambios que sólo se pondrían de manifiesto en muchos años de trabajo con la *Drosophila*. Griffith había descubierto la existencia de dos tipos de bacterias neumocócicas, unas que eran virulentas y ocasionaban una enfermedad que a menudo resultaba mortal, y otras que producían una patología leve o ninguna patología en absoluto. En experimentos realizados con ratones y cuyo objetivo era la obtención de alguna información que pudiera servir para encontrar el tratamiento de la neumonía en las personas, Griffith descubrió que mediante el calor se podía matar a los neumococos del tipo peligroso y que estas bacterias muertas podían inyectarse a los ratones sin que les produjera enfermedad alguna. Pero, cuando estas bacterias muertas se mezclaban con bacterias de la variedad no letal de neumococos, esta mezcla era para los ratones casi tan virulenta como una cepa pura de neumococos virulentos vivos. Sin embargo, Griffith no llegó a descubrir cómo había sucedido es-

to y murió antes de que se conociera la verdadera importancia de su trabajo (resultó muerto en un ataque aéreo durante la *Blitzkrieg* o «guerra relámpago»), pero su descubrimiento provocó un cambio de dirección en los trabajos del microbiólogo estadounidense Oswald Avery (1877-1955), que había estado trabajando con dedicación completa sobre la neumonía en el Rockefeller Institute de Nueva York desde 1913.

Durante la década de 1930, y posteriormente en la de 1940, Avery y su equipo investigaron, mediante una serie de experimentos largos, cautos y cuidadosos, el modo en que una forma de neumococos podía transformarse en otra. Primero repitieron los experimentos de Griffith, pero luego descubrieron que cultivar una colonia de neumococos no letales en una cubeta de cristal (una cubeta de Petri) que contenía también células muertas tratadas con calor procedentes de una cepa virulenta bastaba para que toda la colonia se transformara en neumococos del tipo virulento. Algo se transmitía desde las células muertas a los neumococos vivos, se incorporaba a su estructura genética y los transformaba. Pero ¿qué era? El siguiente paso era romper las células por un procedimiento de helarlas y calentarlas alternativamente, utilizando después una centrifugadora para separar los restos sólidos y líquidos resultantes. Finalmente el agente transformador, fuera lo que fuese, estaba en la parte líquida, no en los sólidos insolubles, con lo cual se reducía el ámbito de búsqueda. Todo este trabajo mantuvo ocupadas a varias personas en el laboratorio de Avery hasta mediados de la década de 1930. En este punto, Avery, que anteriormente había estado supervisando los trabajos de su laboratorio, pero no se había implicado directamente en aquellos experimentos, decidió lanzarse a la ofensiva total para identificar el agente transformador. Lo hizo con la ayuda de dos jóvenes investigadores, el canadiense de origen Colin MacLeod (1909-1972) y, a partir de 1940, Maclyn McCarty (1911-), de South Bend, Indiana.

En parte debido a la insistencia de Avery en prestar una atención esmerada a los detalles, en parte por la interrupción ocasionada por la segunda guerra mundial, y en parte también porque lo que descubrieron era tan sorprendente que parecía difícil de creer,[11] hubo que esperar hasta 1944 para que Avery, MacLeod y McCarty escribieran su informe definitivo sobre la identificación de la sustancia química responsable de la transformación que había observado primero Griffith en 1928. Demostraron que la sustancia transformadora era el ADN, y no una proteína, como se había supuesto de manera generalizada hasta entonces. Pero, incluso en aquel informe de 1944, no fueron tan lejos como para identificar el ADN con el material genético, aunque Avery, que tenía 67 años (una edad notable para alguien que se implicaba en una investigación científica tan fundamental), hizo indicaciones en ese sentido a su hermano Roy.[12]

Las reglas de Chargaff

Sin embargo, las implicaciones estuvieron claras para los que tenían ojos en la cara y, pasando de nuevo la antorcha, el informe de Avery, MacLeod y McCarty de 1944 provocó el siguiente paso fundamental, que fue dado por Erwin Chargaff (1905-). Chargaff nació en Viena, donde obtuvo su doctorado en 1928, el año del descubrimiento de Griffith, pasó dos años en Yale, regresó luego a Europa, donde trabajó en Berlín y París, antes de establecerse definitivamente en Estados Unidos en 1935; pasó el resto de su vida profesional en la Universidad de Columbia. Aceptando las pruebas de que el ADN podía transmitir información genética, Chargaff se dio cuenta de que las moléculas de ADN tenían que presentarse en una gran variedad de tipos, con una estructura interna más complicada que lo que se había supuesto previamente. Utilizando la espectroscopia ul-

travioleta y las nuevas técnicas de cromatografía sobre papel (que nos resulta familiar en su forma más sencilla utilizada en los experimentos que vimos en la escuela: las tintas se descomponen en sus colores integrantes cuando viajan a diferentes velocidades por el papel secante), Chargaff y sus colegas consiguieron demostrar que, aunque la composición del ADN era la misma en cada una de las especies que estudiaron, es sin embargo diferente de una especie a otra en ciertos detalles (aunque sigue siendo ADN, por supuesto). Sugirió que debería haber tantos tipos diferentes de ADN como especies existen en el mundo. Pero, además de esta variedad a gran escala, también descubrió que hay un cierto grado de uniformidad subyacente a esta complejidad de las moléculas de ADN. Las cuatro bases diferentes halladas en las moléculas de ADN se presentan en dos variedades. La guanina y la adenina pertenecen a una familia de sustancias químicas conocidas como purinas, mientras que la citosina y la timina son ambas pirimidinas. Esto se supo cuando las reglas de Chargaff fueron publicadas por su propio autor en 1950. Estas reglas decían que, en primer lugar, la cantidad total de purina que está presente en una muestra de ADN (G + A) es siempre igual a la cantidad total de pirimidina que está presente (C + T); en segundo lugar, la cantidad de A es la misma que la de T, mientras que la cantidad de G es igual a la cantidad de C. Estas reglas son una de las claves para comprender la famosa estructura de doble hélice del ADN. Sin embargo, con el fin de valorar como se mantiene unida esta estructura, necesitamos hacer un inventario de los avances que se produjeron en química justo después de la revolución cuántica.

La química de la vida

Comenzando por la obra de Niels Bohr y culminando en la década de 1920, la física cuántica consiguió explicar las pautas

encontradas en la tabla periódica de elementos y dio algunas ideas sobre por qué algunos átomos desean unirse a otros átomos para formar moléculas, mientras otros no lo hacen. Los detalles de los modelos dependen de los cálculos realizados sobre el modo en que la energía se distribuye entre los electrones dentro de un átomo, que es siempre una distribución encaminada a minimizar la energía global del átomo, salvo que alguna influencia energética procedente del exterior haya excitado al átomo. Aquí no es necesario que entremos en detalles, sino que podemos saltar directamente a las conclusiones, que ya estaban claras incluso en el modelo atómico de Bohr, aunque llegaron a estar mejor fundamentadas tras los avances de la década de 1920. La diferencia más importante es que, mientras Bohr consideró inicialmente a los electrones como diminutas partículas duras, la teoría cuántica los considera como unas entidades extendidas en el espacio, de tal manera que un solo electrón puede rodear el núcleo del átomo, como una onda.

Las propiedades cuánticas de los electrones sólo permiten que cierto número de ellos ocupen cada nivel de energía dentro del átomo y, aunque no es estrictamente preciso, se puede pensar que estos niveles de energía se corresponden con las distintas órbitas existentes alrededor del núcleo. A veces, los químicos llaman *shells* o «capas» a estos estados de energía y, aunque cada capa puede estar ocupada por varios electrones, habría que considerar que cada electrón se extiende por toda la capa. Resulta que las capas que están llenas, en el sentido de que tienen el máximo número de electrones permitido, son capas energéticamente favorecidas en comparación con las que sólo están llenas parcialmente. Sea cual sea el elemento del que estemos hablando, el estado de energía mínima de cada átomo (la capa «más cercana al núcleo») tiene espacio sólo para dos electrones dentro de ella. La capa siguiente tiene espacio para ocho electrones, y lo mismo la tercera capa, aunque con esto ya nos

meteríamos en complicaciones que exceden el alcance de este libro. Un átomo de hidrógeno tiene un solo protón en su núcleo y, por consiguiente, en la única capa ocupada no hay más que un electrón. Desde un punto de vista energético, es un estado menos deseable que tener dos electrones en esa capa, por lo que el hidrógeno puede conseguir al menos una situación de lleno parcial en su camino hacia el estado más deseable uniéndose con otros átomos de tal modo que logre al menos compartir un segundo electrón. Por ejemplo, en las moléculas de hidrógeno (H_2), cada átomo aporta un electrón al par que ambos comparten y que rodea ambos núcleos, produciendo la ilusión de que la capa está completa. Sin embargo, el helio, que tiene dos electrones en su única capa ocupada, se encuentra en un estado energético muy favorable, una especie de nirvana atómico, por lo que no reacciona con otros elementos.

Ascendiendo en la escala de complejidad, el litio, que es el elemento siguiente, tiene tres protones en su núcleo (más cuatro neutrones, habitualmente) y por consiguiente tres electrones en su nube electrónica. Dos de éstos encajan en la primera capa, quedando otro para ocupar la capa siguiente. La característica más importante de un átomo en su relación con otro átomo es la capa ocupada más externa, en este caso, el único electrón que hay en la capa ocupada más externa, razón por la cual el litio, dicho brevemente, está ansioso por dar participación en su electrón solitario y es altamente reactivo, con unas propiedades químicas similares a las del hidrógeno. El número de protones que hay en un núcleo es lo que llamamos el número atómico del elemento. Añadiendo protones al núcleo y electrones a la segunda capa (e ignorando los neutrones, que prácticamente no desempeñan ninguna función en los aspectos químicos a este nivel), nos encontramos con el neón, que tiene en total diez protones y diez electrones, dos de éstos en la capa más interna y ocho en la segunda capa. Como el helio, el neón

es un gas inerte —y con esto, se puede entender por qué se repiten las pautas de las propiedades químicas entre elementos situados a ocho casillas de distancia en la tabla periódica—. Bastará con poner un ejemplo más. Si añadimos otro protón y otro electrón, pasamos del neón al sodio, que tiene dos capas internas repletas y un sólo electrón fuera de estas capas, y observamos que el sodio, cuyo número atómico es 11, tiene unas propiedades químicas similares a las del litio, cuyo número atómico es 3.

El modelo del enlace covalente y la química del carbono

La teoría de que se forman enlaces entre átomos cuando éstos comparten pares de electrones para lograr completar de manera efectiva sus capas fue desarrollada en 1916, inicialmente en sus aspectos cualitativos, por el estadounidense Gilbert Lewis (1875-1946). Esta teoría se conoce como modelo del enlace covalente y tiene una importancia especial a la hora de explicar la química del carbono, que es la base fundamental de la vida, como se puede ver hasta en el ejemplo más sencillo. El carbono tiene seis protones en su núcleo (y casualmente seis neutrones), más seis electrones en su nube electrónica. Dos de estos electrones, como de costumbre, se encuentran en la capa más interna, quedando así cuatro para ocupar la segunda capa, exactamente la mitad del número necesario para que la capa esté completa. Cada uno de esos cuatro electrones puede emparejarse con el electrón que le ofrece un átomo de hidrógeno, con lo que se forma una molécula de metano (CH_4), en la que el átomo de carbono situado en el centro se hace la ilusión de que tiene una capa completa de ocho electrones, y cada uno de los cuatro átomos de hidrógeno que están alrededor tiene la ilusión de tener una capa completa con dos electrones. Si hubiera cinco electrones en la capa más externa, el átomo central sólo

necesitaría formar tres enlaces para completar su juego; si tuviera sólo tres electrones, sólo podría formar tres enlaces, por más que «quisiera» formar cinco. Cuatro enlaces es el máximo que un átomo puede formar,[13] y los enlaces son tanto más fuertes cuanto más cerca esté la capa con respecto al núcleo central, razón por la cual el carbono es «ideal» para formar compuestos. Sustituyendo uno o más de los átomos de hidrógeno por algo más exótico —quizá, incluso otros átomos de carbono o grupos fosfato—, se empieza a ver por qué la química del carbono tiene tanto potencial para producir una amplia variedad de moléculas complejas.

El enlace iónico

No obstante, hay otro modo en que los átomos pueden formar enlaces, lo cual nos hace volver al caso del litio y el sodio. Ambos pueden formar enlaces de este modo, pero utilizaremos el sodio como ejemplo, ya que este tipo de enlace se encuentra en una sustancia muy frecuente en la vida cotidiana: la sal común, NaCl. Este enlace se conoce como enlace iónico y fueron varias personas las que desarrollaron este concepto en los años de cambio del siglo XIX al XX, aunque la mayor parte del mérito por los aspectos básicos de esta idea corresponda probablemente al sueco Svante Arrhenius (1859-1927), que recibió el Premio Nobel en 1903 por su trabajo sobre los iones en solución. El sodio, como ya hemos visto, tiene dos capas internas repletas y un único electrón que queda fuera y solo. Si pudiera librarse de este electrón solitario, se quedaría con una disposición de sus electrones energéticamente ventajosa, similar a la del neón (no del todo idéntica a la del neón, porque el protón de más que tiene el sodio en su núcleo significa que se mantiene unido a sus electrones con algo más de fuerza, aunque la diferencia sea muy pequeña). El cloro, por otra parte, tiene nada

menos que 17 electrones en su nube electrónica (y, por supuesto, 17 protones en su núcleo), dispuestos en dos capas completas y una tercera capa con siete electrones, en la que queda un «hueco» donde podría encajar otro electrón. Si un átomo de sodio cede completamente un electrón a un átomo de cloro, ambos consiguen el nirvana, pero a costa de adquirir una carga eléctrica global —positiva para el sodio y negativa para el cloro —. Los iones resultantes de sodio y cloro se mantienen unidos por fuerzas eléctricas en una estructura cristalina, que se parece bastante a una única molécula gigantesca —las moléculas de NaCl no existen como unidades independientes, de la manera que lo hacen las moléculas de H_2O de CH_4.

Sin embargo, en la física cuántica las cosas rara vez están tan claramente perfiladas o son tan evidentes como nos gustaría que fueran, por lo que es mejor considerar que los enlaces químicos son una mezcla de los dos tipos que hemos mencionado, siendo algunos más bien covalentes, pero con algo de iónicos, otros más iónicos con algo de covalentes, y otros más o menos al 50 por 100 (incluso en las moléculas de hidrógeno se puede ver cómo un átomo de hidrógeno cede completamente su electrón al otro átomo de hidrógeno). Sin embargo, todas estas imágenes no son nada más (y nada menos) que un apoyo para nuestra imaginación. Lo que importa es que las energías que intervienen en el proceso pueden calcularse, y con gran precisión. De hecho, un año después de que Schrödinger publicase su ecuación de onda de la mecánica cuántica, y sólo un año antes del trabajo fundamental de Griffith sobre los neumococos, en 1927, dos físicos alemanes, Walter Heitler (1904-1981) y Fritz London (1900-1954), habían utilizado este planteamiento matemático para calcular la variación que se producía en la energía global cuando dos átomos de hidrógeno, cada uno con su propio electrón solitario, se combinaban para formar una molécula de hidrógeno con dos electrones compartidos. La va-

riación de la energía, que calcularon con gran precisión, se correspondía con la cantidad de energía que, según sabían ya los químicos a partir de sus experimentos, era necesaria para romper el enlace entre los átomos de la molécula de hidrógeno. Otros cálculos posteriores, realizados cuando se perfeccionó la teoría cuántica, concordaban incluso mejor con los experimentos. Los cálculos indicaban que no había arbitrariedades en la disposición de los electrones dentro de los átomos, ni en la de los átomos dentro de las moléculas, y que las disposiciones ordenadas que resultan más estables en los átomos y en las moléculas son aquellas que requieren un mínimo de energía. Esto tenía una importancia decisiva para hacer de la química una ciencia cuantitativa por lo menos hasta el nivel molecular; pero el éxito de este planteamiento fue una de las primeras y más poderosas pruebas de que la física cuántica es aplicable en general, y de un modo muy preciso al mundo atómico, no sólo a casos aislados especiales como la difracción de los átomos al atravesar cristales.

El científico que encajó todas las piezas y convirtió a la química en una rama de la física fue el estadounidense Linus Pauling (1901-1994). Fue uno más de aquellos científicos que tuvieron la virtud de ser el hombre adecuado, en el lugar adecuado y en el momento preciso. Obtuvo su título de ingeniería química en el Agricultural College del Estado de Oregón (una institución precursora de la Universidad Estatal de Oregón) en 1922, dedicándose luego a preparar el doctorado de química física en Caltech; se le concedió este título en 1925, el año en que comenzaron a llamar la atención las teorías de Louis de Broglie sobre ondas electrónicas. Durante los dos años siguientes, exactamente durante la época en que se estaba perfilando definitivamente la mecánica cuántica, Pauling visitó Europa con una beca Guggenheim. Trabajó durante unos pocos meses en Munich, luego en Copenhague en el instituto que dirigía Niels

Bohr, pasó un cierto tiempo con Erwin Schrödinger en Zurich y visitó el laboratorio de William Bragg en Londres.

Bragg, y en particular su hijo Lawrence, son también figuras clave en la historia del descubrimiento de la estructura del ADN. Bragg padre, llamado William Henry, aunque siempre se le conoció como William Bragg, vivió desde 1862 hasta 1942. Se licenció en la Universidad de Cambridge en 1884 y, después de pasar un año trabajando con J. J. Thomson, se trasladó a la Universidad de Adelaida, en Australia, donde nació su hijo William Lawrence, al que siempre se conoció como Lawrence Bragg. William Bragg trabajó sobre los rayos alfa y los rayos X. Después de regresar a Inglaterra en 1909, donde trabajó primero en la Universidad de Leeds hasta 1915 y se trasladó más tarde al University College de Londres, inventó el primer espectrómetro de rayos X, para medir la longitud de onda de dicha radiación. En 1923 fue nombrado director de la Royal Institution, a la que dio nueva vida como centro de investigación y donde fundó el laboratorio que Pauling visitaría unos pocos años más tarde. Fue William Bragg quien tuvo primero la idea de utilizar la difracción de los rayos X para determinar la estructura de moléculas orgánicas complejas, aunque la tecnología de que disponía en la década de 1920 no estaba todavía a la altura de esta empresa.

Lawrence Bragg (1890-1971) estudió matemáticas en la Universidad de Adelaida (licenciándose en 1908) y luego se trasladó a Cambridge, donde inicialmente continuó estudiando matemáticas, pero posteriormente, en 1910, cambió estos estudios por los de física, atendiendo a las sugerencias de su padre, y se licenció en física en 1912. Así pues, Lawrence acababa de empezar como estudiante de investigación en Cambridge y William era catedrático en Leeds cuando llegó de Alemania la noticia de que Max von Laue (1879-1960) que trabajaba en la Universidad de Munich, había observado la difracción de los

rayos X al atravesar estructuras cristalinas.[14] Este fenómeno es exactamente equivalente al modo en que la luz sufre una difracción en el experimento de la doble rendija, pero, dado que las longitudes de onda de los rayos X son mucho más cortas que las de la luz, el espaciamiento entre las «rendijas» debe ser mucho menor; sucede que el espaciamiento entre las capas de átomos que forman un cristal es justo el adecuado para este asunto. Los trabajos dejaron claro que los rayos X son en realidad una forma de onda electromagnética, como la luz, pero con longitudes de onda más cortas; la importancia de este descubrimiento se puede calibrar teniendo en cuenta el hecho de que Von Laue recibió el Premio Nobel por este trabajo sólo dos años más tarde, en 1914.

La ley de Bragg. La química como una rama de la física

El equipo de Von Laue había descubierto unas pautas de difracción ciertamente complicadas, pero no fue capaz de deducir inmediatamente detalle alguno sobre cómo se relacionan estas pautas con la estructura de los cristales a través de los cuales experimentan su difracción los rayos X. Los Bragg debatieron sobre los nuevos descubrimientos, intercambiando opiniones entre ambos, y cada uno trabajó sobre aspectos diferentes del problema. Fue Lawrence Bragg quien descubrió las reglas que hacían posible predecir exactamente dónde se producirían las zonas brillantes en una pauta de difracción cuando un haz de rayos X con una longitud de onda determinada choca con un ángulo de incidencia conocido contra una red cristalina que tiene un espaciamiento concreto entre sus átomos. Casi en el momento en que se descubrió la difracción de los rayos X, quedó establecido que dicha difracción se podía usar para comprobar las estructuras de los cristales, una vez que se había medido las longitudes de onda implicadas (que es donde en-

traría el espectrómetro de William Bragg, construido en 1913). La relación que descubrió Lawrence no tardaría en conocerse como ley de Bragg, e hizo posible trabajar en ambas direcciones: midiendo el espaciamiento de las zonas brillantes obtenidas en el espectro, se podría determinar la longitud de onda de los rayos X, si se conoce previamente el espaciamiento de los átomos dentro del cristal; y, a la inversa, conociendo la longitud de onda de los rayos X, se podría utilizar la misma técnica para medir el espaciamiento de los átomos del cristal, aunque pronto se vio que la interpretación de los datos era terriblemente complicada para las estructuras orgánicas complejas. Fue este trabajo el que puso de manifiesto que en sustancias como el cloruro de sodio (NaCl) no hay moléculas individuales, sino una serie de iones de sodio e iones de cloro dispuestos según una pauta geométrica. Los dos Bragg, padre e hijo, trabajaron y publicaron juntos durante los dos años siguientes y escribieron el libro titulado *X Rays and Crystal Structure*, que se publicó en 1915, sólo veinte años después del descubrimiento de los rayos X. El año anterior, Lawrence se había convertido en miembro del Trinity College, pero su carrera académica se vio interrumpida por la guerra, ya que tuvo que prestar servicios como asesor técnico del ejército británico en Francia; mientras estaba dedicado a esta actividad se enteró, en 1915, de que a su padre y a él mismo se les había concedido el Premio Nobel por sus trabajos. Lawrence fue la persona más joven que recibía este galardón (a los 25 años), y los Bragg son el único equipo formado por padre e hijo que ha compartido el premio por su trabajo conjunto sobre espectroscopia de los rayos X. En 1919, Lawrence Bragg llegó a ser catedrático de física de la Universidad de Manchester y en 1938 sucedió a Rutherford como director del Cavendish Laboratory, de lo que pronto hablaremos al volver a la historia de la doble hélice. En 1954, cuando se marchó de Cambridge, llegó también a ser director de la Royal

Institution, cargo en el que se mantuvo hasta su jubilación en 1966.

Linus Paulino

Siendo estudiante, Pauling aprendió bastante sobre la cristalografía de rayos X, en gran medida gracias al libro escrito por William y Lawrence Bragg, y en 1922 había llevado a cabo ya su primera determinación de una estructura cristalina utilizando esta técnica (el cristal era de molibdenita). Cuando regresó a Estados Unidos, para acceder en 1927 a una plaza en Caltech, donde se convertiría en profesor con dedicación completa en 1931, Pauling manejaba con facilidad todos los conocimientos más actualizados sobre cristalografía de rayos X y no tardó en desarrollar un conjunto de reglas para interpretar los espectros de difracción de los rayos X obtenidos con cristales más complejos. Lawrence Bragg desarrolló prácticamente el mismo conjunto de reglas al mismo tiempo, pero Pauling las publicó primero, para disgusto de Bragg, y hasta ahora se han conocido siempre como reglas de Pauling. Esto desencadenó entre Pauling y Bragg una cierta rivalidad que iba a durar hasta la década de 1950 y desempeñaría un papel en el descubrimiento de la estructura del ADN.

Sin embargo, en esta época, lo que más interesaba a Pauling era la estructura del enlace químico, que estuvo explicando en términos de mecánica cuántica durante más o menos los siete años siguientes. Ya en 1931, después de otra visita a Europa durante la cual se embebió de las nuevas teorías de física cuántica, escribió un gran informe titulado «The Nature of the Chemical Bond» («La naturaleza del enlace químico»), que se publicó en el *Journal of the American Chemical Society*, y donde se exponía todo el trabajo básico y fundamental. A éste le siguieron otros seis informes más, en los que se fue elaborando el tema durante

los dos años siguientes, apareciendo luego un libro en el que se recopilaba todo. «En 1935», comentaba Pauling más tarde, «fui consciente de que tenía unos conocimientos prácticamente completos sobre la naturaleza del enlace químico».[15] Obviamente, lo que había que hacer era seguir hacia adelante, utilizando estos conocimientos para dilucidar la estructura de moléculas orgánicas complejas, tales como las proteínas (recordemos que el ADN no estaba aún considerado como una molécula muy compleja a mediados de la década de 1930). Estas estructuras dieron lugar a una investigación en dos direcciones —la química y el conocimiento del enlace químico revelaron a científicos como Pauling el modo en que podían encajar entre sí las subunidades de las grandes moléculas (en el caso de las proteínas las subunidades son los aminoácidos), mientras que la cristalografía de rayos X les revelaba las formas globales de las moléculas. La química sólo permitía ciertas disposiciones ordenadas de las subunidades, y sólo ciertas disposiciones podían producir las pautas de difracción observadas. Combinando ambas informaciones con la construcción de modelos (a veces tan sencillos como trozos de papel recortados según las formas de las subunidades moleculares y encajados como piezas de un puzzle, y otras veces modelos más complicados en tres dimensiones) se eliminaban muchas alternativas imposibles y finalmente, después de trabajar mucho y muy duramente, esta combinación empezó a revelar las estructuras de ciertas moléculas muy importantes para la vida. Una enorme cantidad de trabajos llevados a cabo por investigadores como el propio Pauling, Desmond Bemal (1901-1971), Dorothy Hodgkin (1910-1994), William Astbury (1889-1961), John Kendrew (1917-1977), Max Perutz (1914-2002) y Lawrence Bragg, dio a los bioquímicos la posibilidad de determinar, durante las cuatro décadas siguientes, la estructura de muchas biomoléculas, tales como la hemoglobina, la insulina y la mioglobina o proteína de los músculos.

Prácticamente no es necesario subrayar la importancia de este trabajo, tanto desde el punto de vista de los conocimientos científicos, como por sus implicaciones para mejorar el cuidado de la salud humana; pero, como nos sucede con la medicina, no podemos entrar aquí en los detalles de la historia. El hilo que deseamos tomar y seguir, de camino hacia la determinación de la estructura del ADN, es la investigación de la estructura de ciertas proteínas que llevaron a cabo Pauling y sus rivales británicos; pero, antes de que lo hagamos, hay algo más que debemos mencionar en relación con la química cuántica.

La naturaleza del enlace de hidrógeno

La existencia de los llamados «enlaces de hidrógeno» ilustra la importancia que tiene la física cuántica para la química —en particular para la química de la vida— y clarifica el modo en que el mundo cuántico difiere del mundo que percibimos en la vida cotidiana—. Los químicos sabían ya que en determinadas circunstancias es posible formar vínculos entre moléculas en las que hay un átomo de hidrógeno, estableciendo una especie de puente. Ya en 1928, Pauling escribió sobre este enlace de hidrógeno, que es más débil que un enlace normal covalente o iónico, y volvió sobre el tema en la década de 1930, primero a propósito del hielo (donde los enlaces de hidrógeno forman puentes entre las moléculas de agua), y posteriormente, junto con su colega Alfred Mirsky, aplicó esta idea a las proteínas. Para entender la formación del enlace de hidrógeno es necesario pensar que el electrón único que está asociado con el protón en el átomo de hidrógeno está como extendido, o untado, en la nube de carga eléctrica, en vez de imaginarlo como una diminuta bola de billar. Cuando el átomo de hidrógeno va a participar en la formación de un enlace convencional, por ejemplo con un átomo de oxígeno, que atrae fuertemente al

electrón del hidrógeno, la nube de carga eléctrica se ve empujada hacia el otro átomo, dejando sólo un delgado recubrimiento de carga negativa en el otro lado del átomo de hidrógeno. A diferencia de lo que sucede con todos los demás átomos químicamente reactivos (el helio no es químicamente reactivo), el hidrógeno no posee otros electrones en capas más internas que le ayuden a contrarrestar la carga positiva de su protón, por lo que algo de su carga positiva se hace «visible» para cualesquiera otros átomos o moléculas que se encuentren en las proximidades. Esta carga positiva atraerá a cualquier átomo cercano que tenga una preponderancia de carga negativa —tal como el átomo de oxígeno de una molécula de agua, que ha adquirido una carga negativa suplementaria proporcionada por sus dos átomos de hidrógeno—. En las moléculas de agua, la carga positiva de cada uno de los dos átomos de hidrógeno puede así establecer un vínculo con la nube de electrones de otra molécula de agua (una por cada átomo de hidrógeno), siendo esto lo que da al hielo una estructura cristalina tan baja que lo hace flotar en el agua. El mérito del trabajo de Pauling sobre el hielo está en que, una vez más, pone valores numéricos en todo esto, calculando las energías relacionadas con el proceso[16] y demostrando que encajan con los valores obtenidos en los experimentos. En sus manos, la idea del enlace de hidrógeno adquirió precisión y se convirtió en ciencia cuantitativa, dejando de ser una idea cualitativa y vaga. En las proteínas, tal como Pauling y Mirsky demostraron a mediados de la década de 1930, cuando las moléculas proteicas de cadena larga se pliegan para dar formas compactas (algo no muy diferentes del modo en que el juguete conocido como serpiente de Rubik se pliega dando formas compactas), los que las mantienen en estas formas son los enlaces de hidrógeno que operan entre distintas partes de la misma cadena. Esto fue un descubrimiento clave, ya que la forma de una molécula de proteína es vital para la actividad que

desarrolla dentro de la maquinaria celular, y todo esto se produce gracias a un fenómeno, el enlace de hidrógeno, que no se puede explicar adecuadamente salvo en términos de física cuántica. No es casualidad que nuestro conocimiento de la base molecular de la vida llegara después de haberse logrado el conocimiento de las reglas de la mecánica cuántica y, una vez más, vemos que la ciencia progresa por evolución, y no por revolución.

Estudios sobre las proteínas fibrosas

El primer gran triunfo logrado a partir de la combinación de un conocimiento teórico del modo en que las subunidades de las proteínas pueden encajar entre sí y de las pautas de difracción de los rayos X producidas por moléculas completas (en realidad por muchas moléculas completas colocadas unas al lado de otras en una muestra), llegó a principios de la década de 1950 con la determinación de la estructura básica de toda una familia de proteínas, las de tipo fibroso que se encuentran en el pelo, la lana y las uñas de los dedos. Lo que iba a ser un largo camino hacia dicho triunfo comenzó cuando William Astbury estaba trabajando en el equipo de cristalógrafos de William Bragg en la Royal Institution de Londres durante la década de 1920. Fue allí donde Astbury inició sus trabajos sobre macromoléculas biológicas, estudiando mediante la difracción de rayos X algunas de estas fibras y consiguiendo las primeras imágenes de proteínas fibrosas por difracción de rayos X, para continuar luego esta línea de investigación después de trasladarse a la Universidad de Leeds en 1928. En la década de 1930 desarrolló un modelo para la estructura de estas proteínas que, en realidad, no era correcto, pero fue Astbury quien demostró que las moléculas de las proteínas globulares (como la hemoglobina y la mioglobina) están formadas por proteínas de cade-

na larga (cadenas polipéptidas) que están replegadas formando bolas.

La estructura de alfa-hélice

Pauling entró en esta historia a finales de la década de 1930, y más tarde recordaba cómo «pasó el verano de 1937 esforzándose por hallar un modo de enrollar una cadena polipéptida en tres dimensiones, que fuera comparable con los datos obtenidos mediante rayos X que había aportado Astbury».[17] Pero haría falta mucho más que un solo verano para resolver el problema. Las proteínas fibrosas parecían más prometedoras, pero debido a la interferencia de la segunda guerra mundial, fue a finales de la década de 1940 cuando, por un lado Pauling y sus colegas de Caltech (especialmente Robert Corey), y por otro lado Lawrence Bragg y su equipo de Cambridge, consiguieron alcanzar la solución. El equipo de Bragg fue el que publicó primero, en 1950 —pero pronto se vio que su modelo era defectuoso, aunque una gran parte de su contenido era verdad—. El equipo de Pauling dio con la solución correcta en 1951, al constatar que la estructura básica de las proteínas fibrosas estaba formada por grandes cadenas polipépticas enrolladas una en la otra a modo de hélice, como los cabos de cuerda que se enrollan juntos para formar una soga. Los enlaces de hidrógeno desempeñaban un papel importante en cuanto a mantener la forma de las espirales. Este hallazgo fue en sí mismo un triunfo espectacular, pero el mundo de la bioquímica se sintió casi desbordado cuando el equipo de Caltech publicó siete informes distintos en el número de mayo de 1951 de los *Proceedings of the National Academy of Sciences*. En estos informes se explicaba detalladamente la estructura del cabello, las plumas, los músculos, la seda, el asta y otras proteínas, así como lo que se denominó estructura de alfa-hélice de las propias fibras. El hecho de que

la estructura fuera helicoidal hizo ciertamente que otros empezaran a pensar en las hélices como estructuras posibles para otras macromoléculas biológicas, pero igual de importante fue el desbordante éxito del planteamiento global utilizado por Pauling, en el que se combinaban los datos obtenidos mediante rayos X, la construcción de modelos y un conocimiento teórico de la química cuántica. Como Pauling recalcó, la estructura de alfa-hélice fue determinada «no por deducción directa a partir de observaciones experimentales realizadas en las proteínas, sino por consideraciones teóricas basadas en el estudio de sustancias más sencillas».[18] Este ejemplo sirvió de inspiración para la obra de los dos científicos que muy pronto determinarían la estructura del propio ADN, llevándose el premio en las mismas narices, no sólo del equipo de Caltech, sino también de otro grupo que estaba trabajando sobre el mismo problema en Londres.

Era obvio que Pauling dirigiría entonces su atención al ADN, que, como ya hemos visto, había sido identificado como material genético en la década de 1940).[19] Es fácil imaginar cómo Lawrence Bragg, al que Pauling ya le había ganado dos veces por la mano, podía haber ansiado una oportunidad para intentar que la estructura del ADN se determinara en su propio laboratorio de Cambridge. De hecho esto no habría sido posible, no por razones científicas, sino por las restricciones que imponía a la libertad de los científicos la limitada financiación que se destinaba a la investigación científica en Gran Bretaña, donde la economía se recuperaba todavía lentamente de los efectos de la guerra. Sólo había dos grupos capaces de abordar el problema de la estructura del ADN, uno dirigido por Max Perutz en el Cavendish Laboratory, y otro que dirigía John Randall (1905-1984) en el King's College de Londres, ambos financiados por la misma organización, el Medical Research Council (MRC); además, había razones obvias para evitar una

duplicación de esfuerzos que supondría derrochar unos recursos limitados. Se llegó finalmente a un acuerdo (nada formal, sino más bien un pacto bien entendido entre caballeros) por el que el equipo del King's College tendría prioridad en el intento de desvelar la estructura del ADN. La pega, para cualquiera que estuviera al tanto de estas cosas, era que el equipo del King's College, dirigido por Maurice Wilkins (1916-), no parecía tener mucha prisa por terminar el trabajo, y además tenía la desventaja de que Rosalind Franklin (1920-1958), una joven investigadora que realizaba unas excelentes fotografías del ADN mediante la difracción de rayos X y tenía que haber sido colaboradora de Wilkins, se vio ampliamente marginada del trabajo por el propio Wilkins a causa de una discrepancia de caracteres que, según parece, pudo haber estado basada, al menos en parte, en prejuicios contra ella por ser mujer.

Francis Crick y James Watson: el modelo de la doble hélice del ADN

Fue el desorden existente dentro del equipo del King's College («equipo» sólo de nombre) el que abrió una ventana de oportunidades para un temerario y joven estadounidense, James Watson (1928-), que se entrenó en Cambridge en 1951 con una beca de posdoctorado, estaba firmemente decidido a investigar la estructura del ADN y no sabía nada sobre pactos entre caballeros ingleses, ni le importaban. A Watson se le asignó espacio para trabajar en la misma habitación en la que estaba un estudiante inglés de doctorado (para lo cual estaba ya bastante entrado en años), Francis Crick (1916-), que resultó tener una formación y unos planteamientos complementarios con respecto a los de Watson, y pronto fue reclutado para la causa. Crick había comenzado como físico y, durante la guerra, realizó trabajos sobre minas para el Ministerio de Marina británico.

Sin embargo, como muchos físicos de su generación, perdió la ilusión por la física al ver las aplicaciones de esta rama de la ciencia a la guerra. También como muchos de sus contemporáneos, fue influido por el libro *What is Life?*, escrito por Erwin Schrödinger y publicado en 1944, en el que el gran físico examinaba el problema de lo que actualmente se llama código genético desde el punto de vista de un físico. Aunque en la época en que escribió el libro Schrödinger no sabía que los cromosomas estaban hechos de ADN, afirmó en términos generales que «la parte más esencial de una célula viva» —la fibra de los cromosomas— puede llamarse con razón «un cristal aperiódico», esbozando así una distinción entre un cristal ordinario, como los de la sal común, con su eterna repetición de una pauta básica sencilla, y la estructura que se podría ver en «por ejemplo, un tapiz de Rafael, que no muestra una aburrida repetición, sino un diseño elaborado, coherente y lleno de significado», incluso a pesar de estar hecho con unos pocos colores dispuestos de maneras diferentes. Otro modo de considerar el almacenamiento de información consiste en utilizar las letras del alfabeto, que expresan la información con palabras, o un código como el Morse, con sus puntos y guiones organizados en determinadas pautas para representar las letras del alfabeto. Entre varios ejemplos de los modos en que la información se podía almacenar y transmitir en un cristal aperiódico, Schrödinger indicó que, con un código similar al alfabeto Morse, pero con tres símbolos, no sólo puntos y guiones, utilizados en grupos de diez, «podrían formarse 88 572 "letras" diferentes». Con estos antecedentes, el físico Crick se sumó en 1949 a la unidad del MRC en el Cavendish Laboratory, como estudiante de investigación, a los 33 años de edad. En relación con el tema de su tesis, estuvo estudiando los polipéptidos y las proteínas mediante rayos X (y consiguió el doctorado en 1953); sin embargo, siempre será recordado por el trabajo que estaba realizando al

mismo tiempo y de manera no oficial, a instancias de Watson, en vez de concentrarse como debía en su doctorado.

Este trabajo estaba totalmente al margen de lo oficial —de hecho, Bragg advirtió en dos ocasiones a Crick que dejara el estudio del ADN al equipo del King's College, y en ambas ocasiones Crick ignoró la advertencia, y únicamente obtuvo cierto tipo de aprobación por parte de Bragg cuando estaba ya en las últimas etapas de la investigación y parecía que Pauling estaba a punto de resolver el misterio. Aunque la idea teórica y la construcción práctica de modelos eran importantes, todo dependía de las fotografías realizadas mediante la difracción de rayos X, y era Astbury el que había obtenido las primeras imágenes de este tipo en 1938. Estas fotografías no fueron superadas por otras mejores (de nuevo, y en gran medida, a causa de la interrupción producida por la guerra) hasta la década de 1950, cuando se hizo cargo del tema el equipo de Wilkins (en particular Rosalind Franklin, ayudada por el estudiante de investigación Raymond Gosling); en realidad, el trabajo de Pauling sobre la estructura del ADN se desarrolló con desventaja, ya que sólo se disponía de los viejos datos de Astbury. Utilizando unos datos que Watson había recogido en una conferencia pronunciada por Franklin en el King's College, y que no había entendido del todo, la pareja de investigadores del Cavendish Laboratory no tardó en encontrar un modelo para el ADN, en el que aparecían las hebras que se enrollaban la una alrededor de la otra y que tenían las bases de los nucleótidos (A, C, G y T) adheridas y sobresaliendo lateralmente. Este modelo fue presentado orgullosamente por Wilkins, Franklin y dos de sus colegas de Londres, que fueron invitados especialmente a acudir a Cambridge para la presentación. Resultó tan violenta la explicación de un modelo tan malo y los comentarios que esto suscitó fueron tan acerbos, que incluso alguien tan animoso como Watson tuvo que refugiarse en su concha durante algún tiem-

po, mientras Crick volvía a dedicarse a sus proteínas. Sin embargo, durante el verano de 1952, en una conversación con el matemático John Griffith (un sobrino de Frederick Griffith que estaba muy interesado por la bioquímica y poseía él mismo conocimientos sobre esta materia) Crick barajó la idea de que las bases de los nucleótidos que se encontraban en la molécula de ADN podrían ensamblarse de algún modo unas con otras, para mantener unidas las moléculas. Sintiéndose levemente interesado por el asunto, Griffith dedujo a partir de las formas de las moléculas que la adenina y la timina podían ensamblarse, estableciendo vínculos mediante un par de enlaces de hidrógeno, mientras la guanina y la citosina podían también ensamblarse, pero mediante un conjunto de tres enlaces de hidrógeno, y, desde luego, lo que no podía ser era que las cuatro bases formaran parejas de ninguna otra manera. Crick no se dio cuenta inmediatamente de la importancia de estos emparejamientos, ni del papel relevante de los enlaces de hidrógeno, y, siendo un recién llegado a la bioquímica, no tenía conocimiento de las reglas de Chargaff. Sin embargo, por una rara casualidad, en julio de 1952 el propio Chargaff visitó el Cavendish Laboratory, donde le presentaron a Crick y, al saber que se interesaba por el ADN, mencionó que las muestras de ADN siempre contienen cantidades iguales de a y G, y también cantidades iguales de C y T. Estos datos, combinados con el trabajo de Griffith, sugerían claramente que la estructura del ADN debía tener pares de moléculas de cadena larga que se mantenían unidas mediante puentes de AG y CT. Además, resulta que la longitud de cada uno de los puentes de CT formados de esta manera es la misma que la de cada uno de los puentes de AG, por lo que habría un espaciamiento uniforme entre las dos cadenas moleculares. Pero, durante meses, el equipo del Cavendish Laboratory estuvo dándole vueltas a la idea, sin hacer ningún trabajo serio sobre el tema. Se limitaron a quedarse galvanizados a finales de 1952 en

una racha frenética de construcción de modelos (Watson hizo la mayoría de las construcciones de modelos, mientras Crick aportaba la mayoría de las ideas brillantes). En diciembre, Peter Pauling, un hijo de Linus Pauling y estudiante ya licenciado, que trabajaba en el Cavendish Laboratory, recibió una carta de su padre en la que éste le decía que había encontrado la estructura del ADN. Esta noticia se propagó como una nube de desesperación por el campamento de Watson y Crick, pero en la carta no se mencionaba detalle alguno relativo al modelo. Sin embargo, en enero de 1953, Peter Pauling recibió una copia del informe que iba a publicar su padre, y se lo mostró a Watson y Crick. La estructura básica era una hélice triple, con tres hebras de cadenas de ADN enrolladas unas con otras. Pero, Crick y Watson (que para entonces ya sabían algo más sobre cómo se presentaban las pautas de la difracción de rayos X) constataron, con gran asombro por su parte, que Pauling había cometido un error y que era imposible que su modelo encajara con los datos que estaba obteniendo Franklin por aquel entonces.

Unos pocos días más tarde, Watson se llevó la copia del informe de Pauling a Londres para enseñársela a Wilkins, que reaccionó mostrándole a Watson una copia impresa de una de las mejores fotografías de Franklin, infringiendo gravemente la ética profesional, ya que lo hizo sin que Franklin tuviera conocimiento de ello. Fue esta imagen, que sólo se podía interpretar en términos de estructura helicoidal, más las reglas de Chargaff y las relaciones establecidas por John Griffith, lo que dio a Crick y Watson la posibilidad de desarrollar, a finales de la primera semana de marzo de 1953, su famoso modelo de la hélice doble, con las moléculas entrelazadas que se mantenían unidas mediante aquellos enlaces de hidrógeno que ensamblaban las bases de nucleótidos en medio de la estructura. Da la casualidad de que Pauling no participaba en la carrera en aquel momento, ya que todavía no se había dado cuenta de que su mode-

lo de la hélice triple estaba equivocado —de hecho, nunca consideró que aquello fuera una carrera, ya que nunca supo lo cerca que estaban del objetivo sus rivales en Inglaterra—. Sin embargo, Franklin, en el King's College, llevaba adelante un razonamiento cuyas líneas generales eran muy parecidas a las de Crick y Watson (sin la construcción física del modelo) y, cuando estaba casi preparada para publicar su propia versión de la hélice doble, le llegaron noticias de Cambridge. En realidad, el día anterior había preparado el primer borrador para que se publicase en *Nature*. La explosión de actividad desencadenada por el informe prematuro de Pauling había tenido como efecto que Crick y Watson le arrebataran el premio de debajo de sus propias narices, no a Pauling, sino a Franklin. El resultado inmediato fue que aparecieron tres informes, uno tras otro, en el número de *Nature* del 25 de abril de 1953. El primer informe, firmado por Crick y Watson, daba detalles sobre el modelo que habían desarrollado ambos y recalcaba su relación con las reglas de Chargaff, minimizando la importancia de las pruebas que podían proporcionar los rayos X; el segundo informe, realizado por Wilkins y sus colegas A. R. Stokes y H. R. Wilson, ofrecía unos datos obtenidos mediante rayos X que sugerían en términos generales la estructura helicoidal de la molécula de ADN; el tercer informe, cuyos autores eran Franklin y Gosling, ofrecía los datos irrefutables proporcionados por las imágenes obtenidas mediante rayos X, que apuntaban al tipo de estructura de doble hélice del ADN propuesta por Crick y Watson, y era esencialmente (aunque nadie más lo sabía en aquella época) el informe en el que había estado trabajando Franklin cuando le llegaron las noticias de Cambridge. Lo que tampoco sabía nadie entonces, ni podía haber adivinado a partir de la presentación de los tres informes, es que, en vez de ser solamente una confirmación del trabajo realizado por Crick y Watson, el informe de Franklin y Gosling representaba un descubrimiento

de la estructura detallada del ADN realizado de manera completamente independiente, y que el descubrimiento de Crick y Watson se basaba en gran medida en los trabajos de Franklin. Tuvo que pasar mucho tiempo para que saliera a la luz el modo en que los datos cruciales obtenidos por rayos X llegaron a Cambridge, cuál era exactamente el papel fundamental que habían desempeñado en la construcción del modelo, y lo mal que Franklin había sido tratada, tanto por su colega del King's College, como por Watson y Crick. La propia Franklin, que se alegró de irse del King's College en 1953 y trasladarse a un entorno más agradable en el Birkbeck College de Londres, nunca sintió que la hubieran tratado de una manera innoble —pero nunca supo toda la verdad, ya que murió en 1958, a causa de un cáncer, a la edad de 38 años—. Crick, Watson y Wilkins compartieron el Premio Nobel de fisiología o medicina sólo cuatro años más tarde, en 1962.



39. Watson y Crick y su modelo de molécula de ADN. 1951.

El código genético

Hay dos características cruciales en la estructura de hélice doble del ADN, que son importantes para la vida, la reproducción y la evolución. La primera es que cualquier combinación de bases —cualquier mensaje escrito con las letras A, C, G y T puede escribir en la longitud de una sola hebra de ADN. Durante la década de 1950 y a principios de la de 1960, los esfuerzos de muchos investigadores, incluido Crick (Watson nunca hizo nada que se pueda comparar con el trabajo que realizó con

Crick sobre la hélice doble) y un equipo del Instituí Pasteur de París, demostraron que el código genético se escribe en realidad en tríos, con conjuntos de tres bases, tales como CTA o GGC, que representan a cada uno de los aproximadamente veinte aminoácidos utilizados en las proteínas que construyen y gobiernan el cuerpo. Cuando una célula fabrica proteínas, la parte de la hélice de ADN cinc contiene los genes correspondientes se despliega, y una cuerda de «codones» de tres letras se copia en una hebra de ARN (lo que plantea preguntas interesantes sobre si fue el ADN o el ARN la primera molécula de la vida); este «ARN mensajero» —cuya única diferencia esencial con el ADN es que tiene uracil en todos los lugares en que el ADN tiene timina— se utiliza entonces como una plantilla para configurar la cuerda de aminoácidos correspondientes a los codones, que se unen entre sí para formar la proteína en cuestión. Este proceso continúa hasta que deje de ser necesario fabricar más cantidad de esta proteína. Para entonces, hace ya bastante tiempo que el ADN ha vuelto a enrollarse y, después de haberse fabricado la cantidad de proteína que sea suficiente, el ARN se desmonta y sus componentes se reutilizan. Queda aún por explicar cómo «sabe» la célula cuándo y dónde debe hacer todo esto, pero los principios que rigen el proceso estaban ya claros a mediados de la década de 1960.

La otra característica importante de la hélice doble del ADN es que sus dos hebras son, en lo relativo a sus bases, como imágenes recíprocas en un espejo, de tal forma que cada a de una hebra aparece frente a la T de la otra, y toda C aparece frente a G. Por consiguiente, si se desenrollaran las dos hebras, y se formara una nueva pareja para cada una de ellas a partir de las unidades químicas que estuvieran disponibles en la célula (como sucede antes de la división celular[20]), en las dos nuevas hélices dobles, de las cuales un ejemplar de cada pareja se transmite a cada célula hija, habrá el mismo mensaje genético, con

las letras del código dispuestas en el mismo orden, y estando a en frente de T y C en frente de G. Aunque los detalles de este mecanismo son sutiles y todavía no se comprenden del todo, es obvio e inmediato que con esto se proporciona un nuevo mecanismo para la evolución. Durante todo el proceso de copia del ADN que se realiza cuando las células se dividen, deben producirse ocasionalmente errores. Algunos fragmentos del ADN se copian dos veces, o algunos no se copian, o una base (una «letra» del código genético) queda reemplazada accidentalmente por otra. Nada de esto tiene mucha importancia en el tipo de división celular cuyo objetivo es producir el crecimiento, ya que el efecto es simplemente que ha cambiado un trocito del ADN en una sola célula (probablemente ni siquiera un trocito de ADN que vaya a utilizar esa célula en concreto). Sin embargo, cuando las células reproductoras se producen por ese proceso especial de división que reparte la mitad de la cantidad de ADN a cada célula hija, no sólo hay más posibilidades de que se produzcan errores (debidas a los procesos extraordinarios de intercambio y recombinación), sino que, si la célula sexual resultante consigue fusionarse con la de una pareja, y el resultado es que se desarrolla un nuevo individuo, todo el ADN, incluidos los errores, tiene oportunidad de expresarse. La mayoría de los cambios resultantes serán perjudiciales y harán que el nuevo individuo sea menos eficiente o, en el mejor de los casos, neutral; pero los casos raros en que un error en la copia del ADN produce un gen, o un conjunto de genes, que hace que su portador esté mejor adaptado al medio son precisamente lo que la evolución darwiniana necesita para que actúe la selección natural.

La edad genética de la humanidad

Desde nuestra perspectiva temática, relativa a cómo la ciencia ha modificado la percepción que tenemos los seres humanos de nuestro propio lugar en la naturaleza, no necesitamos ir más lejos con la historia del ADN. A partir de la década de 1960, se ha realizado una gran cantidad de trabajos encaminados a determinar la composición de los genes a nivel de los codones del ADN, y se tendrá que hacer mucho más hasta que comprendamos los procesos mediante los cuales algunos genes controlan la actividad de otros, y en particular el modo en que los genes se «ponen en marcha» de la forma requerida durante el complicado proceso que hace que un adulto se desarrolle a partir de un único óvulo fertilizado. Pero, con el fin de ver dónde encajamos en la complicada trama de la vida, y para valorar la precisión con que Charles Darwin definió el lugar del ser humano en la naturaleza, podemos dejar a un lado los detalles y observar una imagen más global. Desde la década de 1960, a medida que los bioquímicos han ido investigando el material genético de los seres humanos y de otras especies cada vez con más detalle, ha ido quedando gradualmente más claro en qué medida estamos estrechamente relacionados con los monos africanos, que el propio Darwin consideraba como nuestros parientes vivos más cercanos. A finales de la década de 1990, se había determinado que los seres humanos compartimos el 98,4 por 100 de nuestro material genético con el chimpancé y con el gorila, lo que nos hace ser, según la terminología popular, sólo «un 1 por 100 humanos». Desde varias líneas de ataque, comparando el material genético de especies vivas más o menos estrechamente relacionadas— con los restos fósiles de la época en que estas especies se desgajaban de un tronco común, este grado de diferencia genética se puede utilizar como una especie de reloj molecular y nos dice que las familias del ser humano, el chimpancé y el gorila se dividieron a partir de un linaje común hace cuatro millones de años.

El hecho de que una diferencia genética tan pequeña pueda producir criaturas tan diferentes como nosotros y los chimpancés sugiere que las diferencias importantes deben estar en los genes de control que regulan el comportamiento de otros genes. Esta interpretación de lo evidente está respaldada por las pruebas obtenidas en el proyecto del genoma humano, que terminó en 2001 la realización del mapa de todo el ADN contenido en todos los cromosomas del genoma humano. El mapa resultante o mapa del genoma humano, que es como se suele denominar, hace sencillamente una lista de todos los genes en términos de sartas de codones, A, T, C y G; todavía no se sabe qué hacen realmente la mayoría de los genes en el cuerpo, pero la característica fundamental inmediata del mapa es que muestra que los seres humanos sólo tienen alrededor de 30 000 genes, una cantidad mucho menor que lo que cualquiera habría supuesto, aunque estos 30 000 genes son capaces de fabricar al menos 250 000 proteínas. Esta cantidad es sólo el doble del número de genes de la mosca de la fruta y sólo 4000 más que una variedad hortícola llamada berro, por lo que está claro que no es únicamente el número de genes lo que determina el tipo de cuerpo que esos genes construyen. Los seres humanos no tenemos muchos más genes que otras especies, por consiguiente el número de genes por sí mismo no puede explicar todas las características que nos diferencian de otras especies. Una vez más, la conclusión es que unos pocos genes fundamentales son diferentes en nosotros, en comparación con nuestros parientes más cercanos, y que esos pocos genes afectan al modo en que otros genes actúan.

La humanidad no es algo especial

No obstante, como soporte de todo esto, se encuentra el hecho básico de que ninguna de estas comparaciones sería posible

si no fuera porque todas las especies que se están investigando utilizan el mismo código genético. Al nivel del ADN y de los mecanismos con los que la célula funciona, incluidos el ARN mensajero y la fabricación de proteínas, así como en cuanto a la propia reproducción, no hay diferencia alguna en absoluto entre los seres humanos y las otras formas de vida existentes sobre la Tierra. Todas las criaturas comparten el mismo código genético, y todos hemos evolucionado del mismo modo a partir de formas primordiales (quizás a partir de una única forma primordial) de vida en la Tierra. No hay nada especial en relación con los procesos que han producido a los seres humanos, si se comparan con los procesos que han producido a los chimpancés, los erizos de mar, las coles o la humilde cochinilla. Por otra parte, el hecho de que estamos fuera del escenario central resulta igual de evidente si consideramos el lugar del propio planeta Tierra en el universo en general.

Capítulo 15

EL ESPACIO EXTERIOR

La medición de las distancias a las estrellas

Nuestro conocimiento del universo en su totalidad se basa en dos fundamentos: ser capaces de medir las distancias a las estrellas y ser capaces de determinar la composición de las estrellas. Como ya hemos visto anteriormente, el primer conocimiento real de las distancias a las estrellas surgió en el siglo XVIII, cuando Edmond Halley constató que algunas de las estrellas «fijas» habían cambiado de lugar desde la época en que las habían observado sus predecesores de la Grecia antigua. Para entonces, los astrónomos habían comenzado a realizar mediciones precisas de las distancias en el sistema solar, utilizando el mismo proceso de triangulación que es la base de la topografía. Para medir la distancia a un objeto sin desplazamos realmente hasta él, necesitamos poder ver ese objeto desde los dos extremos de una línea base de longitud conocida. A partir de los ángulos que forman con la línea base las (líneas) visuales al objeto trazadas desde los extremos de dicha línea base, se puede calcular la distancia aplicando la geometría de los triángulos. Esta técnica ya se había utilizado para medir las distancias a la Luna, nuestra vecina más cercana en el espacio, que se encuentra a 384 400 km de distancia; pero en el caso de objetos más distantes se necesitan líneas de base más largas para poder realizar mediciones precisas. En 1671, el astrónomo francés Jean Richer (1630-1696) viajó a Cayena, en la Guayana Francesa, don-

de llevó a cabo observaciones de la posición de Marte sobre un fondo de estrellas «fijas», al mismo tiempo que su colega, el italiano de nacimiento Giovanni Cassini (1625-1712) realizaba unas observaciones similares desde París. Así fue posible calcular la distancia a Marte y, combinando esto con las leyes de Kepler relativas al movimiento planetario, se pudo calcular la distancia de la Tierra (o cualquier otro planeta del sistema solar) al Sol. Las cifras que Cassini obtuvo para la distancia de la Tierra al Sol, 140 millones de km, sólo diferían en un 7 por 100 menos con respecto al valor aceptado actualmente (149,6 millones de km) y aportaban el primer indicio preciso de la escala en que se pueden situar las dimensiones del sistema solar. Otros estudios similares referidos a Venus y realizados durante los tránsitos de 1761 y 1769 (que Halley había predicho) condujeron a una mejora de la estimación de la distancia entre el Sol y la Tierra, conocida como unidad astronómica (UA), y dieron un valor de 153 millones de kilómetros, que se acerca al valor conocido actualmente lo suficiente como para poder pensar que las mejoras posteriores de las mediciones fueron ya sólo un pequeño ajuste, y para permitirnos aceptar que a finales del siglo XVIII los astrónomos tenían una idea muy acertada de la escala en que se encuadran las dimensiones del sistema solar.

Determinaciones de la paralaje de las estrellas

Lo que resultaba altamente preocupante en aquella época era que esto implicaba unas distancias inimaginables desde la Tierra hasta las estrellas. Durante cualquier intervalo de seis meses, la Tierra se mueve desde un lado del Sol al otro, entre los extremos opuestos de una línea base cuya longitud es de 300 millones de kilómetros (o 2 UA). Sin embargo, las posiciones de las estrellas en el cielo nocturno no cambian cuando se observan desde un extremo u otro de esa enorme línea base. Sería de

esperar que las estrellas más cercanas parecieran moverse con respecto a las posiciones de otras estrellas más distantes, del mismo modo que cuando colocamos un dedo a la distancia de un brazo extendido y cerramos alternativamente cada uno de nuestros ojos, la posición del dedo parece moverse con respecto a objetos más distantes (un ejemplo del efecto conocido como paralaje). Es fácil calcular cuánto en apariencia debería moverse una estrella cuando se observa desde diferentes lugares de la órbita de la Tierra. Los astrónomos definen un segundo de arco de paralaje, o parsec, como la distancia que tendría que haber hasta una estrella para que ésta mostrara un desplazamiento de un segundo de arco en el cielo, al ser vista desde los extremos opuestos de una línea base cuya longitud fuera de 1 UA.[1] Así, una estrella situada a un parsec de distancia mostraría un desplazamiento de dos segundos de arco al ser observada desde los extremos opuestos de una línea base de 300 millones de kilómetros de longitud, que es lo que mide aproximadamente el diámetro de la órbita de la Tierra. Desde un punto de vista geométrico sencillo, esta estrella se encontraría a una distancia de 3,26 años luz, que es igual a 206 265 veces la distancia que hay desde nosotros hasta el Sol. Sin embargo, ninguna estrella está lo suficientemente cerca de nosotros como para mostrar esta cantidad de desplazamiento de paralaje cuando la Tierra se mueve alrededor del Sol.

Había ya indicios de que las estrellas debían estar a unas distancias del calibre que este sencillo cálculo marcaba. Christiaan Huygens, por ejemplo, intentó calcular la distancia de la Tierra a Sirio, la estrella que brilla más en el cielo nocturno, comparando su brillo con el del Sol. Para hacer esta comparación, hizo que entrara la luz del Sol en una habitación oscura, dejando que la luz pasara a través de un orificio realizado con un alfiler en una pantalla, y ajustando el tamaño del orificio hasta que la luz que se veía por el pinchazo adquirió un brillo que era apro-

ximadamente el mismo que el de Sirio —lo cual no era fácil, ya que obviamente tuvo que mirar al Sol durante el día y a Sirio durante la noche. Sin embargo, poniendo de manifiesto lo pequeña que es la fracción de luz solar que corresponde al brillo de Sirio, y sabiendo que el brillo de un objeto es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, Huygens afirmó que, si Sirio fuera realmente tan brillante como el Sol, debería estar 27 664 veces más lejos. El escocés James Gregory (1638-1675) mejoró esta técnica comparando el brillo de Sirio con el brillo de los planetas que se pueden ver en el cielo al mismo tiempo. Los cálculos fueron un poco más complicados, ya que era preciso calcular cómo se atenuaba la luz del Sol durante su recorrido hasta los planetas, haciendo una estimación de la cantidad de luz que se reflejaba y calculando cómo se atenuaba esta luz reflejada durante su viaje hasta la Tierra. Pero, en 1668, Gregory aportó una estimación de la distancia a Sirio equivalente a 83 190 UA. Isaac Newton actualizó este cálculo, utilizando unas estimaciones mejoradas de las distancias a los planetas, y obtuvo una distancia a Sirio de 1.000 000 UA, que apareció publicada en su *System of the World* en 1728, el año siguiente a su muerte. La distancia real a Sirio es 550 000 UA, o 2,67 parsecs; pero la aparente precisión del valor calculado por Newton debe tanto a la suerte como al razonamiento, ya que varios de los errores inevitables que resultaron de la imprecisión de los datos de que disponía se compensaron entre sí, anulándose mutuamente, y sin producir efecto alguno en el resultado final.

La medición de las distancias a las estrellas utilizando la técnica de la triangulación o de la paralaje requería conocer las posiciones de las estrellas en el cielo (en realidad, sus posiciones relativas unas con respecto a otras) medidas con una enorme precisión. El catálogo de Flamsteed, que en su día fue un logro extraordinario, daba las posiciones con un error máximo

de 10 segundos de arco (sólo 1/180 del diámetro de la luna llena vista en el cielo). Las primeras distancias a las estrellas no se midieron hasta la década de 1830, porque sólo entonces llegaron las mediciones a ser lo suficientemente precisas, gracias al perfeccionamiento de la tecnología, como para medir los pequeñísimos cambios de paralaje que entraban en los cálculos —pero en cuanto la tecnología llegó a ser suficientemente buena, fueron varios los astrónomos que se pusieron inmediatamente a hacer las mediciones—. Los pioneros eligieron para su estudio aquellas estrellas que, por algún motivo, consideraban relativamente cercanas a nosotros —bien porque las veían muy brillantes, o porque observaban que se movían a través del cielo con el paso de los años (tenían grandes «movimientos propios»), o por ambas razones—. La primera persona que anunció la determinación de una paralaje estelar y la distancia asociada a una estrella fue el alemán Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), que lo hizo en 1838. Eligió 61 Cygni, una estrella de la constelación del Cisne con un amplio movimiento propio, y descubrió que su paralaje era 0,3136 segundos de arco, lo que implicaba una distancia de 10,3 años luz (las mediciones modernas dan una distancia de 11,2 años luz, o 3,4 parsecs). De hecho, el primer científico que «midió» una paralaje estelar fue el escocés Thomas Henderson (1798-1874), cuando estaba trabajando en África del Sur en 1832. Henderson estudió Alpha Centauri, la tercera estrella más brillante del firmamento, y obtuvo una paralaje de 1 segundo de arco (que en cálculos posteriores se redujo a 0,76 segundos de arco, lo cual implicaba una distancia de 1,3 parsecs o 4,3 años luz). Sin embargo, los resultados de Henderson no se publicaron hasta que regresó a Inglaterra en 1839. Alpha Centauri (de la que ahora se sabe que es un sistema triple, con tres estrellas que orbitan una en torno de otra) es la estrella más cercana al Sol y tiene la paralaje más grande que se ha medido jamás. Un año después del anuncio de

Henderson, el astrónomo de origen alemán Friedrich von Struve (1793-1864), que trabajaba en el observatorio Pulkova, cerca de San Petersburgo, midió la paralaje de Vega (también conocida como Alpha Lyrae); la cantidad que obtuvo Von Struve era un poco demasiado alta, pero las mediciones modernas dan una paralaje de 0,2613 segundos de arco y una distancia de 8,3 parsecs (27 años luz). El aspecto importante que hay que destacar en estas mediciones es que todas se refieren a estrellas que están cercanas a nosotros a escala cósmica. La estrella «más cercana» al Sol está 7000 veces más lejos que Plutón, considerado en general como el planeta más distante dentro del sistema solar. Además, una vez que se conoce la distancia verdadera a una estrella, se puede averiguar cuál es su brillo auténtico (llamado la magnitud absoluta) invirtiendo la técnica que Huygens, Gregory y Newton aplicaron al caso de Sirio. De esta manera, sabemos actualmente que Sirio, que se encuentra a 2,67 parsecs de distancia de nosotros, es realmente mucho más brillante que el Sol, algo que Newton y sus contemporáneos no podían constatar por carecer de los medios necesarios. De hecho, estos avances realizados a finales de la década de 1830 lo único que hicieron fue dar una idea de la enorme escala de las dimensiones en el universo. Fue al final del siglo XIX cuando, por fin, fue posible medir las paralajes de una forma más sencilla, gracias a la utilización de placas fotográficas para registrar las posiciones de las estrellas. Anteriormente las posiciones tenían que medirse a ojo, utilizando el retículo del telescopio, y en tiempo real; no es sorprendente que la tasa de mediciones fuera aproximadamente de una por año desde 1840 hasta el final del siglo, de tal forma que en 1900 sólo se conocían 60 paralajes. En 1950 se había determinado ya las distancias a unas 10 000 estrellas (no todas por el método de la paralaje)[2] y, hacia finales del siglo XX, el satélite Hipparcos midió las paralajes

de cerca de 120 000 estrellas, con una precisión de 0,002 segundos de arco.

La espectroscopia y la materia de las estrellas

En muchos aspectos, la astronomía moderna —la astrofísica— no comenzó hasta principios del siglo XX, precisamente gracias a la aplicación de las técnicas fotográficas utilizadas para registrar las imágenes de las estrellas. Al mismo tiempo que daba las distancias a un número de estrellas suficiente como para que los estudios estadísticos tuvieran sentido, la fotografía aportó también un modo de registrar y conservar las imágenes de los espectros de las estrellas, y fue, por supuesto, la espectroscopia (que, como ya hemos dicho, no se desarrolló hasta la década de 1860) la que permitió a los astrónomos obtener información sobre la composición de las estrellas. Se necesitaba además otra información vital: las masas de las estrellas. Esta información se obtuvo mediante estudios de los sistemas binarios, en los que hay dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra. En el caso de unas pocas estrellas binarias cercanas, la separación entre las estrellas se puede medir de forma angular, y este valor se puede convertir en distancias lineales, si se conoce la distancia real al sistema estelar (como es el caso de Alpha Centauri). El inestimable efecto Doppler[3] que se observa en el espectro de la luz que emiten las estrellas de los sistemas binarios, indica a los astrónomos la velocidad a la cual se mueven las estrellas una alrededor de la otra, y, junto con las leyes de Kepler (que se cumplen lo mismo para las estrellas que orbitan una en torno a la otra, como para los planetas que describen sus órbitas alrededor de estrellas), hay suficiente para que los astrónomos puedan calcular las masas de las estrellas. Una vez más, a principios de la década de 1900, hubo una cantidad de observaciones de este tipo que eran suficientes para que los

estudios estadísticos tuvieran sentido. Por lo tanto, no es sorprendente que, justo en aquella época, dos astrónomos que trabajaban de manera independiente en orillas opuestas del océano Atlántico encajaran todas las piezas del rompecabezas y consiguieran dar con la idea más importante que se ha aportado nunca sobre la naturaleza de las estrellas: un diagrama en el que se relacionan los colores de las estrellas con su brillo. Dicho así no parece tan impresionante, pero tiene tanta importancia para la astrofísica como la tabla periódica de los elementos para la química. Sin embargo, y espero que haya quedado claro en capítulos anteriores, como la mayoría de los avances científicos, no se trató realmente de un avance revolucionario, sino de una progresión evolutiva realizada a partir de lo que había sucedido antes y apoyada en los fundamentos que le proporcionaba una tecnología perfeccionada.

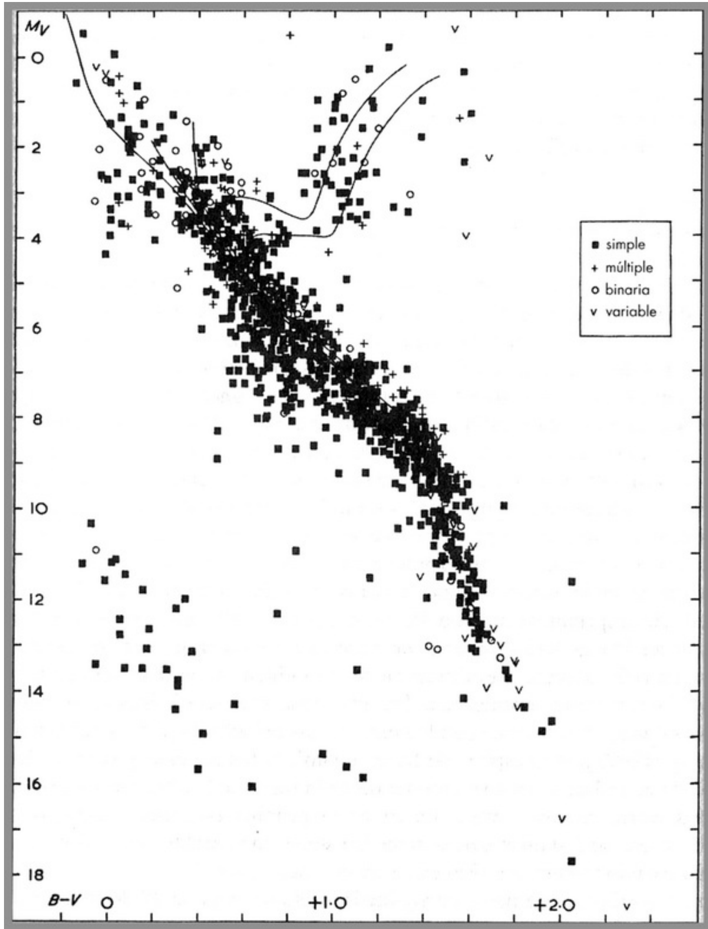
El diagrama de Hertzsprung-Russell

El danés Ejnar Hertzsprung nació en Frederiksberg el 8 de octubre de 1873. Se formó como ingeniero químico, licenciándose en la Escuela Politécnica de Copenhague en 1898, y posteriormente estudió fotoquímica, pero a partir de 1902 trabajó por su cuenta (es decir, con un empleo no remunerado) en el observatorio de la Universidad de Copenhague, aprendiendo a realizar observaciones astronómicas y aplicando sus conocimiento de fotografía a dichas observaciones. Durante este tiempo, descubrió la relación existente entre el brillo de una estrella y su color, pero publicó sus resultados (en 1905 y 1907) en una revista de fotografía, donde pasaron desapercibidos para los astrónomos profesionales de todo el mundo. Aún así, la fama local de Hertzsprung creció hasta el punto de que, en 1909, Karl Schwarzschild (1873-1916), con quien había mantenido correspondencia, le ofreció un puesto en el Observatorio

de Gotinga. Cuando Schwarzschild, aquel mismo año, se trasladó al Observatorio de Potsdam, Hertzsprung se fue con él, permaneciendo allí hasta 1919, año en que se trasladó a los Países Bajos, para ser primero catedrático en la Universidad de Leiden y luego, en 1935, director del Observatorio de Leiden. Aunque oficialmente se retiró en 1944, Hertzsprung continuó con las investigaciones astronómicas después de regresar a su país, Dinamarca, cuando contaba más de ochenta años, y falleció el 21 de octubre de 1967, justo después de haber cumplido los noventa y cuatro años. Hizo numerosas contribuciones a la astronomía en la rama de la observación astronómica, incluidos varios estudios sobre movimientos propios estelares y trabajos sobre la escala cósmica de distancias, pero nada de esto es comparable con el descubrimiento que hizo cuando todavía era técnicamente un aficionado.

Henry Norris Russell nació en Oyster Bay, Nueva York, el 25 de octubre de 1877. Su carrera académica comenzó de un modo más convencional que la de Hertzsprung: estudió en Princeton y estuvo una temporada en la Universidad de Cambridge, antes de ocupar un puesto como catedrático de astronomía en Princeton en 1911. Fue allí donde hizo prácticamente el mismo descubrimiento que Hertzsprung sobre la relación entre los colores de las estrellas y su brillo, pero tuvo el buen sentido de publicarlo (en 1913) en una revista que sí leían los astrónomos, y asimismo tuvo la inspiración de plasmar esta relación en una especie de gráfico, conocido actualmente como diagrama de Hertzsprung-Russell (o sencillamente diagrama HR), lo que hizo que sus lectores pudieran apreciar inmediatamente la importancia del descubrimiento.[4] La contribución de Hertzsprung a este descubrimiento fue reconocida rápidamente, de ahí el nombre que se dio al diagrama. Russell permaneció en su puesto de Princeton durante el resto su vida laboral, aunque también hizo buen uso de los telescopios que se construyeron

en California durante los años siguientes. Además del diagrama HR, Russell realizó importantes contribuciones al estudio de las estrellas binarias y también investigó la composición de la atmósfera del Sol por métodos espectroscópicos. Se jubiló en 1947 y falleció en Princeton el 18 de febrero de 1957.



40. El diagrama de Hertzsprung-Russell, en que se expresa la relación entre el brillo de una estrella (vertical) y su color (horizontal).

La relación color-magnitud y las distancias a las estrellas

La cuestión crucial con respecto al diagrama HR (llamado a veces diagrama color-magnitud, ya que en astronomía se utiliza «magnitud» como otra palabra para referirse al brillo) es que pone de manifiesto que la temperatura de una estrella está estrechamente relacionada con su color. Aquí no estamos hablando sólo de un modo cualitativo sobre los colores del arco tris, aunque es verdad que las estrellas azules y blancas son siempre intrínsecamente brillantes, mientras que algunas estrellas anaranjadas y rojas son brillantes y otras son bastante apagadas[5] (la observación crucial que hizo Hertzsprung durante la primera década del siglo XX). Los astrónomos saben hacerlo mejor y pueden expresar la medición del color de forma cuantitativa. Definen el color de una estrella con gran precisión hablando de la cantidad de energía que irradia a diferentes longitudes de onda, lo que nos dice la temperatura de la superficie que está emitiendo la luz. Utilizando las conocidas propiedades de la radiación de un cuerpo negro, la temperatura de la superficie de una estrella se puede determinar a partir de mediciones a sólo tres longitudes de onda (en caso de necesidad, y conformándonos con un poco menos de precisión, se pueden hacer mediante dos longitudes de onda). Pero el brillo intrínseco de una estrella (su magnitud absoluta) nos dice cuánta energía está emitiendo la estrella de manera global, con independencia de su temperatura. Algunas estrellas rojas pueden ser al mismo tiempo frías y brillantes porque son muy grandes, con lo que, aunque cada metro cuadrado de su superficie sólo esté incandescente al rojo, hay una enorme cantidad de metros cuadrados que despiden energía hacia el universo. Las estrellas pequeñas sólo pueden ser así de brillantes si tienen una incandescencia azul o blanca, de tal forma que sea mucha la energía que atraviese cada metro cuadrado de su pequeña superficie; y las pequeñas estrellas anaranjadas (como el Sol) son intrínsecamente menos brillantes que las estrellas más calientes del mismo tamaño o que las es-

trellas más grandes que tengan la misma temperatura, y lo más interesante llega cuando se tiene en cuenta también las masas de las estrellas. Cuando las temperaturas (o colores) y los brillos (o magnitudes) de las estrellas se reflejan en el diagrama HR, la mayoría de las estrellas quedan en una banda que se extiende cruzando el diagrama en diagonal, de tal forma que las estrellas calientes y de gran masa que tienen más o menos el mismo tamaño (diámetro) que el Sol aparecen en un extremo de la banda, y las estrellas frías y oscuras con menos masa que el Sol quedan en el otro extremo de la banda. El propio Sol es una estrella intermedia que se sitúa aproximadamente en el medio de lo que se llama la secuencia principal. Las estrellas grandes y frías, pero brillantes (los gigantes rojos), quedan por encima de la secuencia principal, y también hay algunas estrellas oscuras y pequeñas, pero calientes (las enanas blancas), que están por debajo de la secuencia principal. Fue precisamente la secuencia principal la que dio a los astrofísicos la primera idea sobre el funcionamiento interno de las estrellas, una idea que desarrolló inicialmente y con amplitud el astrónomo británico Arthur Eddington, al que se suele considerar a veces como el primer astrofísico, ya que fue él quien descubrió la relación entre la masa de una estrella y su posición dentro de la secuencia principal.

Eddington nació en Kendal, Inglaterra, en la región de los Lagos, el 28 de diciembre de 1882. Su padre murió en 1884 y la familia (Arthur tenía una hermana) se trasladó a Somerset, donde le educaron en la doctrina cuáquera. Eddington estudió en el Owens College de Manchester (la institución precursora de la Universidad de Manchester) y posteriormente, desde 1902 hasta 1905, en la Universidad de Cambridge. Trabajó en el Royal Greenwich Observatory hasta 1913, antes de regresar a Cambridge para ocupar la cátedra «plumiana» de astronomía y filosofía experimental (como sucesor de George Darwin), y

en 1914 llegó a ser también director de los observatorios universitarios. Ocupó todos estos cargos hasta su muerte, acaecida en Cambridge el 22 de noviembre de 1944. Dada su destreza como observador y siendo un teórico brillante, un administrador capaz y una persona dotada para comunicar ideas científicas importantes con un lenguaje claro que llegaba a una amplia audiencia (fue el primer divulgador de las teorías de la relatividad de Einstein en inglés), Eddington dejó una profunda huella en la astronomía del siglo XX, pero se le recuerda sobre todo por dos contribuciones cruciales.

La primera contribución se debió en parte a que Eddington era cuáquero y objetor de conciencia con respecto a la guerra. Einstein presentó por primera vez su teoría general de la relatividad ante la Academia de las Ciencias de Berlín en 1915, y al año siguiente la publicó en Alemania, mientras Gran Bretaña y Alemania, por supuesto, estaban enfrentadas por la guerra. Sin embargo, una copia del informe de Einstein llegó a los Países Bajos, que eran neutrales, yendo a parar a las manos de Willem de Sitter (1872-1934), quien pasó una copia a Eddington, que, entre otras cosas, era en aquella época secretario de la Royal Astronomical Society. Cumpliendo con las funciones de su cargo, transmitió la información relativa a los trabajos de Einstein a esta institución; éste fue el comienzo de su papel de portavoz de la teoría general en el mundo angloparlante. Entre otras cosas, la teoría de Einstein predecía que la luz procedente de estrellas distantes debía sufrir una cierta desviación al pasar cerca del Sol, produciendo así un desplazamiento en las posiciones aparentes de dichas estrellas en el cielo. Esto se podía observar durante los eclipses. Por casualidad, se produjo un eclipse adecuado en 1919, pero no fue visible desde Europa. En 1917, la Royal Astronomical Society comenzó a hacer planes de contingencia para enviar un par de expediciones a observar y fotogra-

fiar este eclipse desde Brasil y desde la isla de Príncipe, situada frente a la costa oeste de África si la guerra acababa a tiempo.

Sin embargo, en aquella época había pocas razones para pensar que la guerra podría terminar rápidamente, y las bajas en el frente habían llegado a ser tan numerosas que el gobierno británico implantó el reclutamiento obligatorio, de tal modo que todos los hombres sanos podían ser llamados a filas. Aunque tenía ya 34 años, Eddington era apto para el servicio militar, pero resultaba mucho más valioso para Gran Bretaña como científico que como soldado en las trincheras (aunque no suscribiríamos el argumento de que los científicos merecen un trato especial, ya que *todos* los que estaban en el frente habrían sido más útiles a la sociedad si hubieran regresado a casa). La cuestión fue planteada en el Ministerio del Interior británico por un grupo de científicos eminentes y se comunicó a Eddington que quedaría exento del reclutamiento por su valor para la comunidad científica. Eddington contestó que, si no hubiera sido declarado exento por esos motivos, habría reclamado de todas formas la exención como objetor de conciencia, lo que puso furiosos a los burócratas del Ministerio del Interior. Su primera reacción fue responder que, si Eddington deseaba ser objetor de conciencia, podía reunirse con sus amigos cuáqueros en las tareas agrícolas, para las que estaba preparado de sobra. Pero, alguna habilidosa jugada del director del Royal Greenwich Observatory, Frank Dyson, salvó las apariencias y persuadió al Ministerio de Interior de que aplazara el reclutamiento de Eddington con la condición de que el científico objetor encabezara una expedición con la que el gobierno quería comprobar la predicción de Einstein sobre la desviación de la luz. En cualquier caso, Eddington habría sido la persona ideal para este cometido, ya que tenía experiencia de primera mano con estudios de eclipses realizados desde Brasil mientras trabajaba para el Royal Greenwich Observatory; pero estas maquinaciones que-

daban en el segundo plano de las intrigas frente al hecho de que Eddington era realmente «el hombre que demostró que Einstein tenía razón». Esta vez fue a la isla de Príncipe, pero se envió una expedición similar a Brasil, siendo Eddington quien estaba encargado de procesar y analizar los resultados. La importancia de estas observaciones de eclipses pronto llegaría a ser evidente; pero primero veamos la otra contribución crucial de Eddington a la ciencia.

Cuando el mundo volvió a la normalidad después de la primera guerra mundial, a principios de la década de 1920 Eddington reunió todos los datos que pudo encontrar sobre masas estelares y los relacionó con los datos del diagrama HR, para demostrar que las estrellas más brillantes son las que tiene una masa mayor. Por ejemplo, una estrella de la secuencia principal que tenga 25 veces la masa del Sol es 4000 veces más brillante que el Sol. Esto resultaba lógico. Una estrella se mantiene por la presión que genera en su interior y que contrarresta el tirón hacia dentro que produce la gravedad. Cuanta más masa tenga, más peso habrá presionando hacia el interior y más presión tendrá que generar. Esto sólo lo puede hacer quemando más rápido su combustible —cualquiera que sea este combustible— para generar más calor, que finalmente escapará de la superficie de la estrella en forma de una cantidad mayor de luz a la vista de los que la observamos. La explicación física de lo que sucede es realmente bastante sencilla, por las razones que hemos mencionado anteriormente, relativas al destino de complicadas estructuras en condiciones de temperatura y presión altas, de tal modo que la temperatura existente en el centro de la estrella se puede calcular a partir de las observaciones relativas a su brillo, su masa y su tamaño (determinado a partir del brillo, si se conoce la distancia, y también, una vez que las relaciones entre brillo y color se descubrieron, a partir de su posición en el diagrama HR). Cuando Eddington cuantificó todo esto

con números, hizo un descubrimiento fundamental: todas las estrellas de la secuencia principal tienen aproximadamente la misma temperatura en su parte central, aunque sus masas oscilen en una escala que va desde decenas de veces la masa del Sol hasta un décimo de la masa del Sol. Es como si las estrellas tuvieran instalado un termostato; cuando un globo de gas se hunde bajo su propio peso y aumenta la temperatura en su interior cuando la energía gravitatoria se convierte en calor, nada sucede que pueda detener este proceso hasta que se alcanza una temperatura crítica, a la cual el termostato pone en marcha una reserva casi inagotable de energía (casi inagotable para las medidas que habitualmente maneja un ser humano). En la década de 1920 era ya bastante obvio (al menos para Eddington) de dónde podía proceder la energía.

En el siglo XIX se había producido un debate, a veces feroz, entre los geólogos y los evolucionistas por una parte, y los físicos por la otra, sobre las edades respectivas de la Tierra y el Sol. De una manera bastante razonable, algunos físicos como William Thomson (lord Kelvin) indicaron que en la ciencia de aquel momento no había ningún proceso conocido que pudiera hacer que el Sol brillara durante un tiempo tan largo como el que se requería para explicar la evolución de la vida en la Tierra. Tenían razón, pero antes incluso del final del siglo XIX, como ya hemos visto, se descubrieron fuentes de energía que eran nuevas para la ciencia, y estas fuentes aparecían en forma de isótopos radioactivos. Durante los primeros años del siglo XX, esto llevó a los científicos a especular sobre si una estrella como el Sol se mantendría caliente en el caso de contener radio —sólo 3,6 gramos de radio puro en cada metro cúbico del volumen del Sol sería suficiente para obtener el calor necesario, una teoría que fue discutida, entre otros, por el predecesor de Eddington en la cátedra plumiana, George Darwin. De hecho, la vida media del radio, como pronto se supo, es demasiado corta para

que esto funcione, pero estaba claro que la «energía subatómica» tendría la clave para la longevidad del Sol y de las estrellas. Con los adelantos que tuvieron lugar en la física subatómica durante las dos primeras décadas del siglo XX, y armado con la teoría especial de la relatividad de Einstein y su ecuación $E = mc^2$, en 1920 Eddington pudo explicar las implicaciones ante la audiencia de la junta anual de la British Association for the Advancement of Science:

> Las estrellas recurren a algún enorme depósito de energía, de alguna forma que para nosotros es desconocida. Este depósito difícilmente puede ser otro que la energía subatómica que, como se sabe, existe en abundancia en toda la materia; a veces soñamos que algún día el ser humano aprenderá a liberar y utilizar esta energía para su provecho. Este almacén es casi inagotable; la cuestión es que pueda ser explotado. Sólo en el Sol hay energía suficiente para mantener su producción de calor durante 15 000 millones de años.

A continuación justificaba esta afirmación:

> [Francis] Aston ha demostrado de forma concluyente que la masa del átomo de helio es incluso menor que las masas de los cuatro átomos de hidrógeno que caben en él —y en esto, en todo caso, los químicos estuvieron de acuerdo con él. En la síntesis se produce una pérdida de masa de 1 parte entre 120, siendo el peso atómico del hidrógeno 1,008 y el del helio sólo 4. No voy a insistir en explicar la maravillosa prueba que Aston hizo para comprobar esto, ya que sin duda podrán ustedes oírlo explicado por él mismo. La masa nunca puede ser destruida, y este déficit sólo puede corresponder a la masa de la energía eléctrica liberada en la transmutación. Por consiguiente, podemos calcular al momento la cantidad de energía que se libera cuando se forma el helio a partir del hidrógeno. Si un 5 por 100 de la masa de una estrella está constituida inicialmente por átomos de hidrógeno, que gradualmente se van combinando para formar elementos más complejos, el calor total liberado será más que suficientemente para lo que necesitamos y no tendremos que seguir buscando la fuente de la energía de una estrella.

Eddington iba por buen camino, pero tendrían que pasar todavía varias décadas para que se averiguaran los detalles del modo en que se liberaba la energía dentro de las estrellas, en parte a causa de un malentendido implícito en esa referencia a que el «5 por 100» de una estrella estaba constituido por hidrógeno, y en parte porque para hacer los cálculos completos se

necesitaba la mecánica cuántica, que no estaría totalmente desarrollada hasta finales de la década de 1920. Volveremos a esta historia a su debido tiempo; pero en la década de 1920 la astronomía estelar ya había encontrado otro modo de medir las distancias, al menos a algunas estrellas, y también se había construido un nuevo telescopio con el que poder aplicar aquella técnica; esta combinación pronto ocasionaría otro cambio radical en el modo en que la humanidad veía su posición en el universo. La evidencia que proporcionaba la secuencia principal era que el Sol no es más que una estrella ordinaria, nada especial dentro de la Vía Láctea. La evidencia que emergería finalmente gracias a los nuevos indicadores de distancias era que la propia Vía Láctea tampoco era nada especial dentro del universo.

La relación entre color y magnitud que se reflejaba en el diagrama HR nos da un indicio del calibre de las distancias a las estrellas. Si medimos el color de una estrella, sabremos si pertenece o no a la secuencia principal, y esto nos dice cuál es su magnitud absoluta. Por lo tanto, todo lo que tenemos que hacer es medir su magnitud aparente para averiguar luego a qué distancia está. Al menos en principio. Las cosas no son tan fáciles en la práctica, principalmente a causa del polvo que hay en el espacio, en todo el recorrido de la línea visual que trazamos hasta la estrella en cuestión, lo que hace que su luz palidezca (causando lo que se llama «extinción») y parezca más roja —un proceso conocido como enrojecimiento, pero que no tiene nada que ver con el corrimiento hacia el rojo—. Esto produce unas interferencias que alteran nuestras observaciones relativas al color y al brillo, aunque los efectos a menudo se compensan mutuamente, al menos de una manera aproximada, por el hecho de estar mirando a diferentes estrellas situadas más o menos en la misma dirección en el espacio. Sin embargo, el paso decisivo en la consecución de una escala de distancias cósmicas

surgió a partir de un tipo de investigación bastante diferente, que también estaba en marcha aproximadamente en la época en que Hertzsprung y Russell estaban desarrollando sus teorías sobre la relación color-magnitud.

El descubrimiento se produjo como resultado de una investigación sobre las estrellas de los cielos del hemisferio austral, realizada bajo la dirección de Edward Pickering (1846-1919), que llegó a ser director del Harvard University Observatory en 1876. Pickering era un catalogador inveterado y aportó la inspiración a la siguiente generación de astrónomos estadounidenses, pero su única y más importante contribución a la astronomía se produjo a partir de un estudio de los cielos del hemisferio austral que su hermano William Pickering (1858-1938) realizó para él en Perú. El auténtico trabajo de catalogación — la anotación, escribiendo limpiamente con pluma y tinta en grandes libros de contabilidad las posiciones y el brillo de todas y cada una de las estrellas que habían quedado reflejadas en las placas fotográficas enviadas a Harvard— lo llevaban a cabo equipos de mujeres que, en aquellos tiempos no tan ilustrados, se contrataban generalmente por sueldos más baratos que los de los hombres, y a menudo no eran consideradas como personas que tuviera capacidad intelectual para un trabajo más creativo. A favor de Pickering hay que decir que animó a algunas de estas mujeres que mostraban una cierta aptitud para la astronomía a incorporarse a la investigación propiamente dicha, dando así a unas pocas de ellas la oportunidad de entrar en el mundo académico de la época, que era casi exclusivamente masculino. Una de estas mujeres fue Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), que se sumó al equipo de Harvard en 1895 (hasta tal punto llegaba su entusiasmo por la astronomía, que entró inicialmente como voluntaria sin sueldo, aunque más tarde llegó a ser directora del departamento de fotometría fotográfica). Pickering le encomendó la tarea de identificar las estrellas variables en los

cielos del hemisferio austral, lo cual sólo se podía hacer comparando placas fotográficas de la misma región obtenidas en diferentes momentos, para ver si alguna de las estrellas había cambiado de aspecto.

Tales variaciones pueden producirse por dos motivos. En primer lugar, puede ser porque la «estrella» sea realmente un sistema binario y estemos viendo eclipses parciales ocasionados cuando una estrella se desplaza frente a la otra —y el estudio de los sistemas binarios, como ya hemos visto, es fundamental para medir las masas estelares. En segundo lugar, las estrellas pueden ser intrínsecamente variables y su brillo puede cambiar como resultado de algún cambio en su estructura interna, una cuestión que es en sí misma sumamente interesante. Por lo que sabemos hoy en día, algunas de estas estrellas aumentan y reducen alternativamente su tamaño, brillando de forma intermitente en un ciclo repetitivo, de tal forma que su emisión de luz cambia regularmente a medida que van pasando de una fase a otra del ciclo. Uno de estos tipos de estrellas intermitentes es el que se conoce como las cefeidas, denominadas así según el ejemplo típico de esta clase de estrellas: una estrella llamada Delta Cefeo, que fue identificada como estrella variable por el astrónomo inglés John Goodricke en 1784, dos años antes de su muerte, que le sobrevino cuando sólo contaba 21 años de edad. Todas las cefeidas muestran una pauta característica de aumento y reducción del brillo que se produce regular y repetidamente, pero algunas tienen períodos tan cortos como un día, mientras que otras tienen períodos de más de cien días.

La escala de distancias de las cefeidas

Las placas fotográficas del Perú que Leavitt estaba estudiando en Harvard cubrían dos nubes de estrellas, conocidas como Gran Nube de Magallanes y Pequeña Nube de Magallanes, de

las que actualmente se sabe que son pequeñas galaxias satélites asociadas a la Vía Láctea, la galaxia en la que nosotros vivimos. En el transcurso de su esmerado trabajo, Leavitt se dio cuenta de que las cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes (PNM) mostraban una pauta de comportamiento global, según la cual las cefeidas más brillantes (considerando su brillo medio durante todo un ciclo) recorrían las fases de su ciclo más lentamente. En 1908 se publicó un informe sobre su descubrimiento inicial y, para 1912, Leavitt tenía ya datos suficientes como para expresar esta relación período-luminosidad en una fórmula matemática, desarrollada a partir del estudio que ella misma realizó sobre 25 cefeidas de la PNM. Constató que la razón por la que se ponía de manifiesto esta relación era que la PNM está tan lejos que las estrellas que la componen producen el efecto de estar todas ellas a la misma distancia de nosotros, ya que la luz que emite cualquiera de ellas palidece en la misma cantidad durante su recorrido hasta nuestros telescopios. Por supuesto, existen diferencias en las distancias a las distintas estrellas de la PNM, y estas diferencias pueden ascender a docenas de cientos de años luz, en términos absolutos; pero, comparadas con la distancia a la que se encuentra la PNM, son sólo un pequeño porcentaje de la distancia global de la galaxia a la Tierra, por lo que sólo afectan al brillo aparente de las estrellas en una pequeña fracción del empalidecimiento global debido a su distancia a nuestro planeta. Leavitt halló una relación matemática clara entre el brillo aparente de una cefeida de la PNM y su período, de tal forma que, por ejemplo, una cefeida que tenga un período de tres días tiene sólo una sexta parte del brillo de una cefeida que tenga un período de 30 días. Esto sólo podía significar que las magnitudes «absolutas» de las cefeidas se relacionan una con otra de la misma manera, ya que el efecto de la distancia es prácticamente el mismo para todas las cefeidas de la PNM. A partir de aquel momento todo lo que se necesitaba era

hallar la distancia a tan sólo una o dos cefeidas de nuestro entorno más próximo, de tal modo que fuera posible determinar sus magnitudes absolutas, con lo que luego las magnitudes absolutas de todas las demás cefeidas (y por consiguiente sus distancias) podrían calcularse a partir de la ley de período-luminosidad que Leavitt había descubierto.

De hecho, fue Hertzsprung el primero que midió las distancias a las cefeidas más cercanas, y lo hizo en 1913, consiguiendo así la calibración que necesitaba la escala de las distancias a las cefeidas.[6] Sin embargo, como suele suceder habitualmente en astronomía, las observaciones estuvieron plagadas de dificultades, entre otras, pero nada despreciables, la extinción y el enrojecimiento. La calibración que consiguió establecer Hertzsprung implicaba una distancia de 30 000 años luz hasta la PNM (aproximadamente 10 000 parsecs); las cifras actuales, teniendo en cuenta los efectos de la extinción y el enrojecimiento, de los que Hertzsprung no fue consciente, son 170 000 años luz (52 000 parsecs). A tal distancia, incluso en el caso de que dos cefeidas disten entre sí 1000 años luz, esto representa sólo el 0,6 por 100 de la distancia de ambas hasta nosotros, con un pequeño efecto en su empalidecimiento relativo, debido a la distancia entre ellas. En cualquier caso, incluso aquella estimación tan a la baja que logró Hertzsprung, constituyó la primera indicación de lo grande que es realmente el espacio. La escala de las distancias a las cefeidas, por supuesto, no es menos importante para los estudios de las estrellas de la Vía Láctea, que para los estudios del universo en sentido amplio. Algunos cúmulos estelares (*clusteres*), agrupados juntos en el espacio, contienen docenas o cientos de estrellas de masa, colores y brillos diferentes, pero con que hubiera una sola Cefeida en el cúmulo, sería suficiente para conocer la distancia a todas estas estrellas, con todo lo que esto implica para determinar las propiedades de las estrellas y, por ejemplo, suprimir los efectos del enrojeci-

miento y la extinción al representarlas en un diagrama HR. Pero fue en las comprobaciones realizadas más allá de la Vía Láctea donde las cefeidas cambiaron la percepción que tenemos de nuestra posición en el universo.

Las cefeidas y las distancias a otras galaxias

Estas comprobaciones fueron posibles gracias al desarrollo de una nueva generación de telescopios, en gran medida como resultado del entusiasmo de un hombre, George Ellery Hale (1868-1938), un astrónomo que tenía, por una parte, un don para persuadir a los benefactores de que debían participar con grandes sumas de dinero y, por otra parte, una gran habilidad para la gestión que le permitió ver dónde estaban las aplicaciones afortunadas de aquel dinero para la construcción de nuevos telescopios y observatorios, primero en la Universidad de Chicago, luego en Mount Wilson, California, y finalmente en Mount Palomar, también en California. El instrumento clave en esta fase concreta de exploración del universo fue el reflector de 100 pulgadas de diámetro conocido como telescopio Hooker (con el nombre del benefactor que lo pagó), que se instaló en Mount Wilson en 1918 y todavía está en uso hoy en día (o, más bien, en la noche). Durante 30 años fue el telescopio más grande de la Tierra y transformó nuestro conocimiento del universo. Funcionó sobre todo en manos de dos hombres: Edwin Hubble (1889-1953) y Milton Humason (1891-1972).

No se debe creer todo lo que se ha escrito sobre Hubble, quien, por decirlo educadamente, exageró sus primeros logros, inventándose historias sobre sus proezas como atleta y pretendiendo que con anterioridad había sido un abogado de éxito. Sin embargo, esto no resta importancia a su trabajo como astrónomo.

La primera persona que utilizó las cefeidas para confeccionar un mapa de la Vía Láctea que se parece al que tenemos actualmente fue un antiguo discípulo de Russell, Harlow Shapley (1865-1972), que lo hizo durante la segunda década del siglo XX. Utilizó un reflector de 60 pulgadas en Mount Wilson, que fue desde 1908 hasta 1918 el mayor telescopio del mundo, y fue uno de los primeros que usó el de 100 pulgadas, pero se fue de allí para convertirse en director del Harvard College Observatory en 1921, perdiendo así la oportunidad de sacarle todo el partido a las posibilidades que ofrecía el nuevo telescopio. Lo que Shapley no sabía era que algunas de las estrellas que él consideró cefeidas pertenecían en realidad a otra familia diferente, conocida en la actualidad como estrellas RR Lyrae. Se comportan de una manera similar a las cefeidas (lo que hace que sean por sí mismas unos importantes indicadores de la distancia), pero con una relación diferente períodoluminosidad. Afortunadamente, algunos de los errores que esta confusión introdujo en los cálculos de Shapley quedaron contrarrestados por el hecho de que no estaba teniendo en cuenta debidamente la extinción. Para entonces estaba ya claro (y había estado cada vez más claro desde la época de Galileo y Thomas Wright) que la banda de luz que se ve en el cielo nocturno y se conoce como Vía Láctea es un sistema aplanado con forma de disco que contiene un enorme número de estrellas, y que el Sol es sólo una estrella más entre esta multitud. Muchos habían creído que el Sol se encontraba en el centro de este disco de estrellas que forma la Vía Láctea. Sin embargo, también hay concentraciones de estrellas, en sistemas aproximadamente esféricos, que se conocen como *clusters* globulares (o cúmulos globulares de estrellas), y están situados por encima y por debajo del plano de la Vía Láctea, ocupando un volumen de espacio esférico en el que está incrustado el disco de la Vía Láctea. Trazando las distancias a los cúmulos globulares de estrellas, Shapley encontró el centro

de esta esfera y dejó claro que el Sol no está en el centro de la Vía Láctea. En 1920, sus mediciones indicaban que la propia Vía Láctea tenía un diámetro de unos 100 000 parsecs y que su centro estaba a aproximadamente 10 000 parsecs (más de 30 000 años luz) de distancia de nosotros. Sus cifras seguían estando afectadas por el problema de la extinción y por la confusión de las estrellas RR Lyrae con las cefeidas —en la actualidad sabemos que calculó casi correctamente la distancia al centro de la Vía Láctea (las cifras modernas dan entre 8000 y 9000 parsecs), pero el diámetro global que calculó para la galaxia era demasiado grande (actualmente su diámetro se estima en unos 28 000 parsecs)—. El propio disco de la Vía Láctea tiene un espesor de sólo un par de cientos de parsecs —realmente es muy delgado, si se compara su espesor con su diámetro—. Pero los números son menos importantes que el hecho de que Shapley hubiera conseguido bajar un poco más la categoría de nuestro hogar en el espacio, relegando al Sol a una ubicación ordinaria en los suburbios del disco de la Vía Láctea y reconociéndolo como un miembro sin importancia de un sistema que contiene, según los cálculos, varios cientos de miles de millones de estrellas.

No obstante, a principios de la década de 1920, era una idea ampliamente difundida que la Vía Láctea dominaba el universo. Aunque se veía otras manchas difusas de luz en el cielo nocturno (como las Nubes de Magallanes), se pensaba que eran pequeños sistemas menores que se comportaban como satélites de la Vía Láctea (algo parecido en cierto modo a los cúmulos globulares de estrellas), o unas nubes de gases incandescentes situadas dentro de la Vía Láctea. Sólo unos pocos astrónomos, entre los que el más vociferante era el estadounidense Heber Curtís (1872-1942), opinaron que muchas de aquellas «nebulosas espirales» eran en realidad galaxias de pleno derecho, situadas tan lejos que no se podía distinguir de una en una las estre-

llas contenidas en ellas, ni siquiera con los mejores telescopios disponibles en aquellos tiempos.[7] También dijeron que la Vía Láctea tenía un tamaño mucho menor que el que había calculado Shapley y que era sólo un «universo isla» entre muchas galaxias de tamaño comparable diseminadas por el vacío.

Aquí es donde Hubble entra en escena. En el invierno de 1923-1924, utilizando el telescopio Hooker de 100 pulgadas, Hubble consiguió distinguir estrellas individualmente dentro de una gran nebulosa espiral conocida como M31, situada en la dirección de la constelación Andrómeda (a veces se denomina la nebulosa de Andrómeda o la galaxia de Andrómeda). Lo que aún era mejor, para su sorpresa, pudo identificar varias cefeidas en esta nebulosa y calcular su distancia, que resultó ser de 300 000 parsecs, casi un millón de años luz; con la calibración moderna de la escala de distancias a las cefeidas y un mejor tratamiento de problemas como la extinción, se sabe ahora que la galaxia de Andrómeda está aún más lejos, a una distancia de 700 000 parsecs. Inmediatamente después de realizar este descubrimiento, Hubble descubrió cefeidas en varias otras nebulosas similares, demostrando que Curtís tenía razón en lo esencial. Tras el desarrollo de otras técnicas para medir distancias a las galaxias, incluidas las observaciones de estrellas que explotaban, las supernovas, que tienen todas aproximadamente el mismo brillo absoluto máximo, quedó claro finalmente que, del mismo modo que hay cientos de miles de millones de estrellas en la Vía Láctea, también hay cientos de miles de millones de galaxias en el universo visible, que se extiende a lo largo de miles de millones de años luz en todas las direcciones. El sistema solar es una mota insignificante dentro de lo que también es una mota insignificante en toda su gran amplitud. Pero el paso clave para hacer el mapa del universo sigue siendo la relación magnitud-distancia para las cefeidas, con respecto a la cual se calibran los indicadores secundarios de la distancia (como son

las supernovas). Y, como resultado, quedaron unos restos de las dificultades iniciales debidas a problemas, tales como la extinción, que, hasta bien entrada la década de 1990, estuvieron distorsionando nuestra percepción del lugar que ocupamos en el universo.

Como muestra el ejemplo de la gran nebulosa espiral conocida como M31, en la escala de distancias utilizada por Hubble todo parecía estar más cerca de lo que realmente está. Para una galaxia de un cierto tamaño (por ejemplo, del mismo tamaño absoluto que la propia Vía Láctea), cuanto más cerca está, mayor es el trozo de cielo que cubre. Lo que los astrónomos realmente miden es el tamaño angular que tiene la galaxia en el cielo y, si piensan que está más cerca que lo que está en realidad, creerán que es más pequeña que lo que en realidad es. El aeroplano de juguete de un niño colocado enfrente de mi cara y el avión de pasajeros 747 que se dispone a aterrizar parecen tener el mismo tamaño angular, pero si quiero calcular cuanto mayor es el 747 en comparación con el avión de juguete, esta proporción dependerá de lo lejos que piense que está el avión de pasajeros. El valor excesivamente bajo que se calculó para las distancias de las galaxias significa que al principio se subestimaron los tamaños de todas las galaxias situadas más allá de la Vía Láctea, y parece ser que esta galaxia estaba considerada como el mayor objeto de su clase en todo el universo. Los sucesivos ajustes que fueron perfeccionando la escala de distancias cambiaron gradualmente esta percepción durante décadas, pero hasta finales de la década de 1990 no quedó finalmente establecido que nuestra galaxia es precisamente de tamaño mediano, y esto se consiguió utilizando los datos sobre cefeidas que obtuvo el telescopio espacial Hubble estudiando un número significativo de galaxias espirales similares a la Vía Láctea.[8]

Continuando sus investigaciones a partir del trabajo que realizó en 1923-1924 y con la ayuda de Milton Humason a fi-

nales de la década de 1920 y principios de 1930, Hubble amplió sus mediciones de distancias al caso de galaxias situadas en zonas más alejadas del universo, llegando lo más lejos posible con el telescopio de 100 pulgadas. Aunque las distancias directas a las cefeidas sólo se podían medir para un puñado de galaxias relativamente cercanas, conociendo las distancias a estas galaxias, Hubble pudo calibrar otros fenómenos de las galaxias en general, tales como las supernovas o el brillo de objetos especiales situados dentro de las espirales, y luego utilizó estas calibraciones como indicadores secundarios para medir distancias a galaxias más remotas en las que las cefeidas no podían ser observadas con una buena resolución, ni siquiera con el telescopio de 100 pulgadas. Precisamente mientras llevaba a cabo este estudio, Hubble hizo el descubrimiento al que su nombre quedaría asociado para siempre: que existe una relación entre la distancia a una galaxia y el corrimiento hacia el rojo en el espectro de la luz procedente de dicha galaxia.

La preponderancia de los corrimientos hacia el rojo en la luz procedente de las «nebulosas» había sido descubierta en realidad por Vesto Slipher (1875-1969) durante la segunda década del siglo XX, mientras trabajaba en el Lowell Observatory (en Flagstaff, Arizona), utilizando un telescopio de refracción de 24 pulgadas. Los trabajos que realizó para obtener espectros de unos objetos tan difusos, utilizando fotográficamente este telescopio, se encuadraban dentro de la tecnología más avanzada de su tiempo, y Slipher estaba convencido de que estas nebulosas difusas debían estar compuestas por muchas estrellas individuales, dada la similitud entre sus espectros y los espectros de las estrellas en general. Pero sus instrumentos no eran lo suficientemente avanzados como para ver con una buena resolución las estrellas individuales de estas nebulosas, por lo que no pudo dar el paso que más tarde daría Hubble en la década de 1920 y no consiguió medir las distancias a las nebulosas que es-

tudió. En 1925, Slipher había medido 39 corrimientos hacia el rojo en las nebulosas, pero sólo había hallado dos corrimientos hacia el azul. Otros astrónomos habían medido sólo cuatro corrimientos hacia el rojo y ningún corrimiento hacia el azul en unos sistemas que Slipher no había estudiado primero, aunque muchos de los resultados de Slipher habían sido confirmados por otros observadores. La interpretación natural de estos datos fue que se trataba de una consecuencia del efecto Doppler, porque la mayoría de las nebulosas se movían alejándose rápidamente de nosotros, y sólo dos se desplazaban hacia nosotros. Hubble y Humason comenzaron midiendo distancias a nebulosas que anteriormente Slipher habían observado espectroscópicamente, pero tomaron sus propios datos espectroscópicos (en realidad fue Humason quien lo hizo) para comprobar sus aparatos y confirmar los resultados de Slipher. Luego ampliaron este tipo de investigación a otras galaxias. Aparte de los muy pocos objetos que ya se conocían, no se encontraron corrimientos hacia el azul.[9] Descubrieron que la distancia de una galaxia es proporcional a su corrimiento hacia el rojo, un fenómeno sobre el cual se informó en 1929 y que se conoce actualmente como ley de Hubble. Para Hubble este descubrimiento tenía valor como indicador de distancias —ahora bien, él (o Humason) sólo tenía que medir el corrimiento hacia el rojo de una galaxia y se podía deducir la distancia a la que la galaxia se encontraba—. Pero la importancia de este descubrimiento iba mucho más allá de esto, y unos pocos astrónomos se percataron rápidamente de ello.

Esbozo de la teoría general de la relatividad

La explicación del descubrimiento realizado por Hubble y Humason llegó desde la teoría general de la relatividad de Einstein, la cual, como ya hemos visto, se había publicado en 1916.

La característica que convierte a esta teoría en «general» (como contrapuesta al carácter restringido de la teoría «especial» de la relatividad) es que contempla las aceleraciones, y no sólo el movimiento en línea recta y a velocidad constante. Sin embargo, el gran acierto de Einstein fue constatar que no existe distinción alguna entre aceleración y gravedad. Afirmó que esta idea se le ocurrió un día, mientras estaba sentado en su mesa de trabajo de la Oficina de Patentes de Berna, cuando se dio cuenta de que una persona que cae de un tejado se sentiría sin peso y no percibiría el tirón de la gravedad —la aceleración de su movimiento hacia abajo anula la sensación de peso, porque ambas son «exactamente» iguales—. Todos hemos experimentado la equivalencia entre la aceleración y la gravedad en un ascensor —cuando el ascensor se pone en marcha y comienza a subir, nos sentimos presionados contra el suelo y nos sentimos más pesados; cuando el ascensor se detiene, nos sentimos más ligeros porque está desacelerando y, en el caso de ascensores rápidos, el resultado puede ser que nos alcemos sobre las puntas de los pies . Lo genial por parte de Einstein fue encontrar un conjunto de ecuaciones para describir la aceleración y la gravedad, todo en el mismo paquete —así como toda la teoría especial de la relatividad y, de hecho, toda la mecánica newtoniana como casos especiales de la teoría general—. No es en absoluto cierto, a pesar de todo lo que los titulares de los periódicos vociferaron después de la expedición de Eddington de los eclipses, que la teoría de Einstein «derrocara» a la obra de Newton; la gravedad newtoniana (en particular la ley del inverso del cuadrado o ley de la gravitación universal) sigue siendo una buena descripción del modo en que el universo funciona, salvo en condiciones extremas, y cualquier teoría mejor que ella ha de reproducir todos los éxitos de la teoría newtoniana, además de introducir elementos nuevos, del mismo modo que, si se desarrolla alguna vez una teoría mejor que la de Einstein,

esta nueva teoría tendrá que explicar todo lo que la teoría general explica, y más todavía.

Einstein necesitó diez años para desarrollar la teoría general, a partir de los fundamentos que le proporcionaba la teoría especial, aunque hizo muchas otras cosas en aquellos años, desde 1905 a 1915, dejando la Oficina de Patentes en 1909 para convertirse en un profesor con dedicación exclusiva en la Universidad de Zurich, y dedicando gran parte de sus esfuerzos a la física cuántica más o menos hasta 1911, año en que trabajó durante un breve tiempo en Praga, antes de ocupar un puesto en la ETH de Zurich (donde había sido un estudiante tan vago). Posteriormente, en 1914, se instaló en Berlín. La clave del andamiaje matemático en que se apoya la teoría general de la relatividad se lo suministró, cuando estaba en Zurich en 1912, un viejo amigo, Marcel Grossmann (1878-1936), que había sido compañero de estudios en la ETH, donde solía prestar a Einstein los apuntes que tomaba en las clases para que éste los copiara, siempre que a Einstein le suponía una molestia intolerable acudir él mismo a las clases. En 1912, Einstein ya había aceptado la limpia representación de la teoría especial de la relatividad mediante una geometría del espacio-tiempo cuatridimensional uniforme que le ofrecía Hermann Minkowski. Ahora bien, Einstein necesitaba una forma más general de geometría para manejar la forma más general de física que había desarrollado, y fue Grossmann quien le orientó hacia la obra del matemático del siglo XIX Bemhard Riemann (1826-1866), que había estudiado la geometría de las superficies curvas y había desarrollado los instrumentos matemáticos necesarios para manejar este tipo de geometría (llamada geometría no euclídea, ya que Euclides estudió superficies planas) en tantas dimensiones como se desee.

Este tipo de investigación matemática sobre la geometría no euclídea tenía ya un largo recorrido tras de sí. A principios del

siglo XIX, Karl Friedrich Gauss (1777-1855) trabajó sobre las propiedades de unas geometrías en las que, por ejemplo, las líneas paralelas pueden cortarse entre sí (la superficie de la Tierra es un ejemplo, ya que muestra las líneas de latitud, que son paralelas en el ecuador y se cortan en los polos). Gauss no llegó a publicar todos estos trabajos, muchos de los cuales no se dieron a conocer hasta después de su muerte, aunque fue él quien acuñó el término que se traduce como «geometría no euclídea». Algunos de sus logros en esta rama de la geometría fueron redescubiertos más tarde por el húngaro Janos Bolyai (1802-1860) y el ruso Nikolai Lobachevski (1793-1856), trabajando independientemente el uno del otro, en las décadas de 1820 y 1830; sin embargo, al igual que el entonces desconocido trabajo de Gauss, estos modelos trataban sólo casos específicos de geometría no euclídea, tales como la geometría de la superficie de una esfera. La excelente contribución de Riemann consistió en encontrar, y presentar en una conferencia pronunciada en la Universidad de Gotinga en 1854, un tratamiento matemático general que fue la base para toda la geometría, ya que proporcionaba una serie de descripciones matemáticas diferentes para una serie de geometrías diferentes, que son todas ellas igualmente válidas y entre las que se encuentra, sólo como un ejemplo más, la geometría euclídea, tan familiar en la vida cotidiana. Estas teorías fueron introducidas en el mundo angloparlante por el matemático británico William Clifford (1845-1879), que tradujo la obra de Riemann (que no se publicó hasta 1867, un año después de la temprana muerte de Riemann, debida a la tuberculosis) y la utilizó como base para formular una hipótesis según la cual el mejor modo de describir el universo en toda su amplitud es en términos de espacio curvo. En 1870 leyó un informe ante la Cambridge Philosophical Society en el que hablaba de «variación en la curvatura del espacio» y hacía una analogía consistente en decir que cualesquiera

«pequeñas porciones del espacio tienen, de hecho, una naturaleza análoga a la de pequeñas colinas situadas sobre una superficie que es por término medio plana; es decir, las leyes ordinarias de la geometría no son válidas para esas pequeñas porciones del espacio». Hoy en día, según las teorías de Einstein, la analogía se hace a la inversa: se considera que las concentraciones de materia, tales como el Sol, forman pequeños hoyuelos en el espacio-tiempo de un universo que en cualquier otro lugar es plano.[10] Pero es una forma saludable de recordar el modo en que avanza la ciencia, paso a paso, y no mediante la obra de individuos aislados, considerar el hecho de que Clifford hizo su versión de la analogía nueve años antes de que naciera Einstein. El propio Clifford murió, también de tuberculosis, el año en que Einstein nació, 1879, y nunca llegó a desarrollar sus teorías plenamente. Pero, cuando Einstein entró en escena, las cosas habían madurado y era claramente el momento de que surgiera la teoría general, por lo que su aportación, aunque muy inspirada, no es el hecho aislado de un genio, como a menudo se da a entender.

La teoría general de la relatividad explica la relación entre el espacio-tiempo y la materia, considerando que la gravedad es la interacción que vincula ambas cosas. La presencia de la materia hace que se curve el espacio-tiempo, y el modo en que los objetos materiales (o incluso la luz) siguen las curvaturas del espacio-tiempo es lo que se pone de manifiesto ante nosotros como gravedad. El resumen más elegante de esta idea es el aforismo «la materia le dice al espacio-tiempo cómo ha de curvarse; el espacio-tiempo le dice a la materia cómo ha de moverse». Naturalmente, Einstein deseaba aplicar sus ecuaciones al mayor conjunto de materia, espacio y tiempo que existe: al universo. No tardó en hacerlo, en cuanto terminó la teoría general de la relatividad y publicó los resultados en 1917. Las ecuaciones o fórmulas que desarrolló tienen una característica extraña e

inesperada. En su forma original, no permiten la posibilidad de un universo estático. Las ecuaciones insistían en que el propio espacio, con el paso del tiempo, debía expandirse o contraerse, pero no podía permanecer siempre igual. Recordemos que, en aquella época, se creía que la Vía Láctea era prácticamente la totalidad del universo, y no mostraba signo alguno de expansión o contracción. Se había medido ya por primera vez unos pocos corrimientos hacia el rojo de varias nebulosas, pero nadie sabía qué significaba aquello y, en cualquier caso, Einstein no conocía los trabajos de Slipher. En consecuencia, añadió otro término a sus ecuaciones para mantener invariable, sin contracciones ni expansiones, el universo que describían. Este término se suele llamar constante cosmológica y se representa habitualmente mediante la letra griega lambda (λ). Según las propias palabras de Einstein, «ese término es necesario únicamente para hacer posible una distribución cuasi-estática de la materia, lo cual es necesario dadas las pequeñas velocidades de las estrellas». En realidad, es erróneo hablar de «la» constante cosmológica. Las ecuaciones creadas por Einstein permitían elegir diferentes valores del término landa, algunos de los cuales harían que el universo se expandiera más rápido, al menos uno de ellos lo mantendría invariable, y otros harían que se contrajese. Pero Einstein creyó que había descubierto una descripción matemática única de la materia y el espacio-tiempo que encajaba con el universo tal como éste se conocía en 1917.

El universo en expansión

Sin embargo, en cuanto se hicieron públicas las ecuaciones de la teoría general, otros matemáticos las utilizaron para describir distintos modelos del universo. También en 1917, Willem de Sitter, en Holanda, encontró una solución para las ecuaciones de Einstein, con la que describió un universo que se

expandía a una velocidad exponencial, de tal modo que, si después de cierto tiempo la distancia entre dos partículas se duplica, tras pasar otro intervalo igual de tiempo se cuadruplica, en el siguiente intervalo de la misma duración se multiplica por ocho, en el siguiente por 16, y así sucesivamente. En Rusia, Alexander Friedmann (1888-1925) encontró una familia completa de soluciones para estas ecuaciones, algunas de las cuales describían universos en expansión y otras universos que se contraían, y publicó los resultados en 1922 (lo que causó en cierto modo el enfado de Einstein, ya que había tenido la esperanza de que sus ecuaciones constituirían una descripción única del universo). Además, el astrónomo belga Georges Lemaitre (1894-1966), que también era sacerdote, publicó independientemente en 1927 unas soluciones similares para las ecuaciones de Einstein. Hubo algunos contactos entre Hubble y Lemaitre, que visitó Estados Unidos a mediados de la década de 1920 y estuvo presente en la reunión celebrada en 1925 donde se anunció el descubrimiento de cefeidas en la nebulosa de Andrómeda. El anuncio corrió a cargo de Henry Norris Russell (en nombre de Hubble, que no estuvo presente en la reunión). Lemaitre también mantuvo correspondencia con Einstein. De una forma u otra, a principios de la década de 1930, cuando Hubble y Humason publicaron los corrimientos hacia el rojo y las distancias correspondientes a cerca de cien galaxias, demostrando que el corrimiento hacia el rojo es proporcional a la distancia, no sólo estaba claro que el universo se encontraba en expansión, sino que ya se disponía de una descripción matemática de dicha expansión en realidad, un surtido de modelos cosmológicos de este tipo.

Es importante aclarar que el corrimiento hacia el rojo que se constata en cosmología no está ocasionado por el movimiento de las galaxias a través del espacio y, por consiguiente, no es un efecto Doppler. La causa es que el espacio intergaláctico se esti-

ra a medida que pasa el tiempo, exactamente del modo que describían las ecuaciones de Einstein, pero que Einstein se negaba a creer en 1917. Si el espacio se estira mientras la luz viaja hacia nosotros desde otra galaxia, entonces la propia luz se estirará a longitudes de onda más largas, lo cual, para la luz visible, significa moverla hacia el extremo rojo del espectro.[11] La existencia de la relación observada entre el corrimiento hacia el rojo y la distancia (ley de Hubble) implica que el universo era más pequeño en el pasado, no en el sentido de las galaxias estuvieran todas ellas apretadas formando un bloque en un mar de espacio vacío, sino que no había espacio ni entre las galaxias, ni en el «exterior» de ellas —ese exterior no existía—. A su vez, esto implica que hubo un comienzo para el universo —un concepto que repugnaba a muchos astrónomos de la década de 1930, incluido Eddington, pero que el sacerdote católico romano Lemaitre aceptó de todo corazón—. Lemaitre desarrolló la idea de lo que él llamó el átomo primordial (o, a veces, el huevo cósmico), en el que se encontraba inicialmente toda la materia del universo en un solo bloque, como en una especie de núcleo superatómico, que luego explotó y se fragmentó, como una colosal bomba de fisión. Esta idea captó la atención del público en general durante la década de 1930, pero la mayoría de los astrónomos coincidieron con Eddington en la creencia de que realmente no pudo haber existido un comienzo del universo; lo que actualmente se conoce como modelo del *Big Bang*[12] no llegó a formar parte de las líneas principales de la astronomía (y con pocos adeptos) hasta la década de 1940, a raíz del trabajo del exaltado George Gamow (1904-1968), un ruso emigrado, y sus colegas de la Universidad George Washington y de la Universidad Johns Hopkins, en Washington DC.

Aparte de la dificultad que tuvieron al principio muchos astrónomos para aceptar la idea de que el universo había tenido un comienzo, en las décadas de 1930 y 1940 surgió otro pro-

blema con esta interpretación directa de las observaciones realizadas por Hubble y Humason (y continuadas pronto por otros astrónomos, aunque el equipo de Mount Wilson se reservó las ventajas tecnológicas del telescopio de 100 pulgadas). Aunque seguía estando plagada por los problemas ligados a las observaciones mencionados anteriormente, y por la confusión entre las cefeidas y otros tipos de estrellas variables, la escala de distancias desarrollada por Hubble a principios de la década de 1930 fue un error, según los conocimientos actuales, ya que los verdaderos valores aparecían multiplicados aproximadamente por diez. Según esto, Hubble pensó que el universo se expandía a una velocidad diez veces mayor que la que se admite hoy en día. Utilizando las ecuaciones cosmológicas derivadas de la teoría general de la relatividad (en su forma más sencilla estas soluciones corresponden a un modelo del universo que desarrollaron Einstein y De Sitter, cuando trabajaban juntos a principios de la década de 1930, y que se conoce como modelo de Einstein-De Sitter) se puede calcular directamente, a partir de la relación entre el corrimiento al rojo y la distancia, el tiempo que ha transcurrido desde el *Big Bang*. Debido a que los datos de Hubble implicaban que el universo se expandía con una velocidad diez veces mayor que la aceptada actualmente, los cálculos basados en estos datos daban una edad del universo que era un décimo del valor aceptado hoy en día, sólo 1200 millones de años —apenas un tercio de la edad de la Tierra determinada de forma correcta—. Estaba claro que había algún error y, hasta que se resolvió la cuestión de la edad del universo, muchos tuvieron dificultades para tomarse en serio la idea del átomo primordial.

El modelo del estado estacionario del universo

Este problema de la edad del universo fue precisamente una de las razones por las que Fred Hoyle (1915-2001), Herman Bondi (1919-) y Thomas Gold (1920-) encontraron, durante la década de 1940, una alternativa al *Big Bang,* conocida como el modelo del estado estacionario[*] del universo. En esta teoría, el universo se consideraba eterno y siempre en expansión, pero siempre con un aspecto muy parecido al que presenta actualmente, ya que continuamente se crea nueva materia, en forma de átomos de hidrógeno, dentro de los huecos que dejan las galaxias a medida que se alejan. La creación de esta materia nueva se realiza justo a la velocidad adecuada para fabricar nuevas galaxias que rellenen los huecos. Esta alternativa al *Big Bang,* que era lógica y viable, estuvo vigente durante la década de 1950 y parte de la de 1960 —después de todo, no es más sorprendente la idea de que la materia se cree continuamente, un átomo tras otro, que decir que todos los átomos del universo se crearon de una vez, en un acontecimiento único llamado *Big Bang*—. Sin embargo, con observaciones mejor realizadas, con la aplicación de las nuevas técnicas de radioastronomía desarrolladas durante la segunda mitad del siglo XX, se demostró que las galaxias más lejanas del universo, que observamos mediante ondas luminosas o de radio que partieron de ellas hace mucho tiempo, son diferentes de las galaxias cercanas, lo que prueba que el universo cambia a medida que pasa el tiempo y avanza la edad de las galaxias. La propia cuestión de la edad del universo fue resolviéndose gradualmente a medida que se dispuso de telescopios mejores (sobre todo el reflector de 200 pulgadas de Mount Palomar, terminado en 1947 y bautizado en honor a Hale) y cuando se resolvió la confusión entre las cefeidas y otros tipos de estrellas variables. Se tardó mucho tiempo en acortar las incertidumbres en aquellas mediciones, aún difíciles, de la velocidad de expansión del universo, hasta llegar a una incertidumbre (o error) del 10 por 100 —de hecho, esto no se

logró hasta finales de la década de 1990, y si se consiguió fue gracias al telescopio espacial Hubble.[13] Pero, a finales del siglo XX, la edad del universo estaba ya determinada con una precisión razonable, como algo situado entre 13 000 y 16 000 millones de años. Con estas cifras nos podemos quedar tranquilos, en el sentido de que el universo es más viejo que cualquier otra cosa de la que podamos medir la edad, incluidas la propia Tierra y las estrellas más antiguas.[14] Pero todo esto quedaba todavía perdido en un futuro lejano, cuando Gamow y sus colegas comenzaron una investigación científica sobre lo que sucedió realmente en el *Big Bang*.

LA NATURALEZA DEL BIG BANG

En realidad, Gamow había sido uno de los discípulos de Friedmann durante la década de 1920, y también visitó la Universidad de Gotinga, el Cavendish Laboratory y el Instituto Niels Bohr en Copenhague, donde realizó contribuciones importantes al desarrollo de la física cuántica. En particular demostró cómo la incertidumbre cuántica podía hacer que las partículas alfa escaparan de los núcleos atómicos radioactivos durante la desintegración alfa, en un proceso conocido como efecto de túnel. La fuerza nuclear fuerte es la que mantiene en su lugar a las partículas alfa, pero en estos núcleos dichas partículas tienen casi la energía suficiente para escapar, aunque no toda la que necesitan, según la teoría clásica. Sin embargo, la teoría cuántica dice que una partícula alfa puede «tomar prestada» la energía suficiente para realizar esta tarea, gracias a la incertidumbre cuántica, ya que el mundo nunca está del todo seguro de la cantidad de energía que posee. La partícula escapa como si hubiera excavado un túnel para salir del núcleo, y luego amortiza la energía que ha tomado prestada, antes de que el mundo tenga tiempo para darse cuenta de que se haya prestado

esa energía. Se debe a uno de los muchos descuidos del comité del Premio Nobel el hecho de que Gamow nunca recibiera el más alto galardón por su contribución fundamental a los conocimientos que tenemos actualmente sobre física nuclear.

La formación básica de Gamow en física nuclear y física cuántica marcó el modo en que él mismo y su discípulo Ralph Alpher (1921-), junto con el colega de este último Robert Herman (1922-1997), investigaron la naturaleza del *Big Bang*. Al mismo tiempo que trabajaba en su plaza de la Universidad George Washington, durante la década de 1940 y a principios de la de 1950 Gamow fue asesor en el laboratorio de física aplicada de la Universidad Johns Hopkins, donde Alpher trabajó con dedicación exclusiva a partir de 1944, mientras estudiaba para su graduación, su licenciatura y finalmente para su título de doctor (concedido en 1948) a las últimas horas de la tarde y durante los fines de semana en la Universidad George Washington. Herman tuvo una formación académica más convencional, con un doctorado en Princeton, y entró en el Johns Hopkins Laboratory en 1943, realizando inicialmente, como Alpher, trabajos relacionados con la actividad bélica. También como Alpher, trabajó sobre el universo primitivo en su tiempo de ocio, técnicamente este trabajo fue para él como un pasatiempo. Bajo la supervisión de Gamow, Alpher investigó para su doctorado sobre el modo en que los elementos más complicados podían formarse a partir de elementos sencillos en las condiciones que, según suponían ellos, debían haber existido en el *Big Bang*, cuando todo el universo observable estaba encerrado en un volumen no mayor que nuestro sistema solar actual. Los elementos químicos de que estamos hechos nosotros y el resto del universo visible han de proceder de algún lugar, y Gamow supuso que la materia prima utilizada para su fabricación fue una caliente bola de fuego compuesta por neutrones. Esto se decía en una época en que se había hecho explotar reciente-

mente las primeras bombas atómicas y se estaba construyendo los primeros reactores nucleares. Aunque se clasificó una gran cantidad de la información relativa a cómo los núcleos producen interacciones unos con otros, existía un banco de datos en expansión constituido por información no clasificada relativa a lo que les sucede a distintos tipos de materiales cuando se irradian o bombardean con neutrones procedentes de los reactores nucleares, un proceso en el cual los núcleos absorben los neutrones uno por uno, convirtiéndose en núcleos de elementos más pesados y librándose del exceso de energía mediante la emisión de radiación gamma. A veces, se crean de este modo núcleos inestables y su composición interna se ajusta emitiendo radiación beta (electrones). Aunque se supuso que la materia prima del universo habían sido los neutrones, también los neutrones se desintegran de este modo para producir electrones y protones, que juntos constituyen el primer elemento: el hidrógeno. Añadiendo un neutrón a un núcleo de hidrógeno se consigue un núcleo de deuterio (hidrógeno pesado), añadiendo además un protón se forma helio-3, y añadiendo otro neutrón se obtiene helio-4, que también se puede formar por fusión de dos núcleos de helio-3 y la expulsión de dos protones, y así sucesivamente. Casi todo el deuterio y el helio-3 se convierte en helio-4, de un modo u otro. Alpher y Gamow examinaron todos los datos disponibles relativos a la captación de neutrones para distintos elementos y descubrieron que los núcleos que se formaban con mayor facilidad de este modo eran los de los elementos más comunes, mientras que los núcleos que no se formaban fácilmente de este modo correspondían a elementos raros. En particular, descubrieron que este proceso producía una enorme cantidad de helio en comparación con otros elementos, lo que encajaba con las observaciones relativas a la composición del Sol y las estrellas que los científicos estaban realizando por aquella época.

Este trabajo, además de proporcionar a Alpher el material necesario para su doctorado, constituyó la base de un informe científico publicado en la revista *Physical Review*. Cuando llegó el momento de presentar el informe, Gamow, un bromista empedernido, decidió (pasando por alto las objeciones de Alpher) añadir el nombre de su viejo amigo Hans Bethe (1906-) como coautor, por la sencilla razón de que le gustaba como quedaban los nombres Alpher, Bethe, Gamow (alfa, beta, gamma). Además, le encantó la coincidencia de que el informe apareciera en el número de *Physical Review* del 1 de abril de 1948. Esta publicación marcó el inicio de la cosmología del *Big Bang* como una ciencia cuantitativa.

Poco después de que se publicara el informe alfa-beta-gamma (que es el nombre que se le da habitualmente), Alpher y Herman descubrieron un aspecto importante de la naturaleza del *Big Bang*. Constataron que la radiación caliente que llenaba el universo en la época del *Big Bang* debía seguir llenando el universo en la época actual, pero tendría que haberse enfriado en una cantidad cuantificable a medida que se producía la expansión universal del espacio —se puede imaginar esto como un corrimiento extremo hacia el rojo, estirándose las longitudes de onda de los rayos gamma y rayos X originales hasta llegar a la zona del radio en el espectro electromagnético—. Más tarde, antes de finalizar el año 1948, Alpher y Herman publicaron un informe en el que daban cuenta de los cálculos que había realizado con respecto a este efecto y suponían que esta radiación de fondo[*] es la radiación del cuerpo negro a la temperatura adecuada. Descubrieron que la temperatura actual de la radiación de fondo estaría en torno a los 5 K (grados Kelvin) —es decir, aproximadamente −268 °C—. En aquella época, Gamow no aceptaba la validez de este trabajo, pero después de

1950 se convirtió en un ardiente partidario de esta teoría y trató sobre ella en varias de sus publicaciones de divulgación,[15] a menudo con algunos detalles erróneos en los cálculos (nunca se le dio bien hacer cuentas) y sin reconocer adecuadamente los méritos de Alpher y Herman. En consecuencia, a menudo se le menciona indebidamente como autor de la predicción relativa a la existencia de esta radiación de fondo, cuando el mérito es únicamente de Alpher y Herman.

La medición de la radiación de fondo

Nadie hizo demasiado caso de esta predicción en aquel momento. Los que estaban enterados de su existencia pensaron equivocadamente que la tecnología disponible para estudiar radioastronomía no era lo bastante buena como para medir aquel débil siseo de mido de radiofrecuencias que llegaba de todas las direcciones del espacio; los que tenían acceso a esta tecnología parecían no haberse enterado de la existencia de esta predicción. Sin embargo, a principios de la década de 1960, dos especialistas en radioastronomía que trabajaban con una antena de bocina en el centro de investigaciones de los laboratorios Bell, cerca de Holmdel, Nueva Jersey, descubrieron que se veían invadidos por un débil ruido de radiofrecuencias procedente de todas las direcciones del espacio, correspondiente a una radiación del cuerpo negro con una temperatura de unos 3 K (−270 °C). Amo Penzias (1933-) y Robert Wilson (1936-) no tenían ni idea de qué era lo que habían descubierto, pero carretera abajo, en la Universidad de Princeton, un grupo que trabajaba bajo la dirección de Jim Peebles (1935-) estaba construyendo un radiotelescopio destinado específicamente a investigar este eco del *Big Bang* —no a causa de los trabajos pioneros de Alpher y Herman, sino porque Peebles había llevado a cabo de manera independiente unos cálculos similares—. Cuando llegó

a Princeton la noticia de lo que los investigadores de los laboratorios Bell habían descubierto, Peebles pudo explicar al momento qué era lo que estaba pasando. Este descubrimiento, publicado en 1965, marcó el momento en que la mayoría de los astrónomos comenzó a tomar en serio el modelo del *Big Bang* como una descripción plausible del universo en que vivimos, en vez de como una especie de juego teórico abstracto. En 1978, Penzias y Wilson compartieron el Premio Nobel que se les concedió por su descubrimiento, un honor que quizá merecían menos que Alpher y Herman, que nunca recibieron este premio.[16]

MEDICIONES MODERNAS: EL SATÉLITE COBE

Desde entonces, el fondo continuo de radiaciones de microondas (o radiación de fondo) se ha observado con todo detalle mediante numerosos instrumentos diferentes, incluido el famoso satélite COBE, y se ha confirmado que es una radiación perfecta del cuerpo negro (la radiación del cuerpo negro más perfecta que se ha visto jamás) con una temperatura de 2,725 K. Es la prueba más poderosa de que realmente existió un *Big Bang* —o, dicho con un lenguaje más científico, que el universo visible pasó por una fase extremadamente caliente y densa hace unos 13 000 millones de años—. Los cosmólogos del siglo XXI están intentando descifrar el misterio del modo en que esta bola de energía incandescente y extremadamente caliente pudo llegar a existir, pero aquí no vamos a explicar estas teorías, que están todavía en una fase especulativa, y terminaremos nuestro relato de la historia de la cosmología en el momento en que existen unas pruebas abrumadoras de que el universo, tal como lo conocemos, emergió de un *Big Bang* —si se desea poner una fecha a este descubrimiento, puede valer la del anuncio de los resultados obtenidos por el COBE, es decir, la primavera de

1992—. De hecho, puesto que la observación ha demostrado que las hipótesis formuladas eran correctas, el modelo del *Big Bang* tiene ahora todo el derecho a llamarse teoría del *Big Bang*.

Pero ¿qué fue exactamente lo que emergió del *Big Bang*? Cuando Alpher y Herman perfeccionaron aún más sus cálculos, pronto descubrieron que había un problema importante en relación con el esquema global de fabricar elementos (nucleosíntesis) mediante la adición repetida de neutrones, una por uno, al núcleo. Pronto se vio que no existen núcleos estables con masas de 5 u 8 unidades en la escala atómica. Comenzando con un mar de protones y neutrones (según se cree actualmente, fabricados a partir de energía pura en la bola de fuego del *Big Bang* y de acuerdo con la fórmula $E = mc^2$), es fácil producir hidrógeno y helio; además, las versiones modernas de los cálculos realizados por los pioneros del equipo de Gamow nos dicen que una mezcla de aproximadamente un 75 por 100 de hidrógeno y un 25 por 100 de helio pudo fabricarse de esta manera en el *Big Bang*. Pero, si se añade un neutrón al helio-4, se obtiene un isótopo tan inestable que expulsaría el neutrón añadido antes de que éste tuviera tiempo de producir una interacción y hacer que el núcleo fuera estable. Se puede producir una pequeña cantidad de litio-7 mediante unas interacciones raras en las que se unen un núcleo de helio-3 y otro de helio-4, pero, en las condiciones existentes en la bola de fuego del *Big Bang*, el paso siguiente es producir un núcleo de berilio-8, que inmediatamente se rompe en dos núcleos de helio-4. Si en el *Big Bang* se pudiera fabricar sólo hidrógeno y helio (y pequeños vestigios de litio-7 y deuterio), entonces todos los demás elementos tendrían que haber sido producidos en algún otro lugar. Ese «otro lugar» —el único lugar alternativo posible— es el interior de las estrellas. Sin embargo, fue surgiendo gradualmente el conocimiento del modo en que esto sucedía, comenzando con la constatación, a finales de la década de 1920 y durante la de

1930, de que el Sol y las estrellas no están hechos de la misma mezcla de elementos que la Tierra.

La idea de que el Sol estuviera hecho básicamente de la misma clase de materia que la Tierra, pero más caliente, tenía una larga tradición, y formaba parte de los frutos que dio el primer intento conocido de describir los cuerpos celestes en lo que llamaríamos ahora términos científicos, en vez de considerarlos dioses. Esto se remonta al filósofo griego Anaxágoras de Atenas, que vivió en el siglo V a. C. El filósofo Anaxágoras desarrolló sus teorías sobre la composición del Sol cuando un meteorito cayó cerca de Egospótamos. El meteorito estaba al rojo vivo cuando llegó al suelo y había caído del cielo, por lo que Anaxágoras dedujo que procedía del Sol. Dado que en gran parte estaba compuesto por hierro, Anaxágoras llegó a la conclusión de que el Sol estaba hecho de hierro. Como no sabía nada sobre la edad de la Tierra, ni sobre cuánto tiempo tardaría en enfriarse una gran bola de hierro al rojo vivo, o si podría existir una forma de energía que mantuviera el brillo del Sol, la idea de que el Sol fuera una bola de hierro incandescente constituía en aquella época una buena hipótesis de trabajo, aunque no fueron muchos los que tomaron en serio a Anaxágoras en aquellos momentos. Cuando los científicos, a principios del siglo XX, empezaron a pensar sobre la energía nuclear como fuente de calor del Sol, la constatación de que la desintegración radioactiva de una cantidad relativamente pequeña de radio podía mantener el brillo del Sol (aunque sólo fuera durante un tiempo relativamente corto) fomentó la idea de que la mayor parte de la masa del Sol podría estar formada por elementos pesados. En consecuencia, cuando unos pocos astrónomos y físicos comenzaron a investigar cómo la fusión nuclear podría aportar la energía que mantiene calientes al Sol y a las estrellas, lo que hicieron al principio fue investigar procesos en los que los protones (núcleos de hidrógeno) se fusionan con núcleos de elementos pesa-

dos, suponiendo que los elementos pesados eran abundantes y los protones escasos dentro de las estrellas. Incluso Eddington, con los comentarios prescientes que formuló en 1920 sobre la conversión del hidrógeno en helio, lo único que estaba haciendo era sugerir que el 5 por 100 de la masa de una estrella podría estar inicialmente en forma de hidrógeno.

El proceso mediante el cual los protones penetran en los núcleos pesados es lo contrario del proceso de la desintegración alfa, en la que una partícula alfa (un núcleo de helio) escapa de un núcleo pesado y esta fuga se rige por las mismas reglas del efecto cuántico de túnel que descubrió Gamow. Los cálculos de Gamow relativos al efecto de túnel se publicaron en 1928 y, sólo un año más tarde, el astrofísico galés Robert Atkinson (1889-1982) y su colega alemán Fritz Houtermans (1903-1966), que previamente habían trabajado con Gamow, publicaron un informe en el que daban cuenta del tipo de reacciones nucleares que podrían producirse dentro de las estrellas cuando los protones se fusionaran con los núcleos pesados. Su informe comenzaba con las palabras siguientes: «Gamow ha demostrado recientemente que las partículas dotadas de carga positiva pueden penetrar en el núcleo del átomo, aunque la creencia tradicional considere que la energía de estas partículas es inadecuada». Esta es la cuestión clave. En particular, Eddington había utilizado las leyes de la física para calcular la temperatura existente en el centro del Sol a partir de su masa, su radio y la velocidad a la que libera energía en el espacio. Sin el efecto de túnel, esta temperatura —unos 15 millones de grados Kelvin— es demasiado baja para que los núcleos puedan reunir las fuerzas suficientes para vencer su repulsión eléctrica mutua y mantenerse juntos. A principios de la década de 1920, cuando los físicos estudiaron por primera vez las condiciones de temperatura y presión necesarias para que los protones se fusionaran produciendo helio, a muchos de ellos el problema de la temperatura

demasiado baja les pareció insuperable. En su libro *The Internal Constitution of the Stars*, publicado en 1926, precisamente cuando se estaba produciendo la revolución cuántica, Eddington contestó lo siguiente: «no vamos a discutir con los críticos que sostienen que las estrellas no están lo suficientemente calientes como para que tenga lugar este proceso; lo que les decimos es que se vayan a buscar *un lugar más caliente*». Generalmente se ha interpretado esto entendiendo que Eddington mandaba a sus críticos al infierno. Fue la revolución cuántica, y en particular el efecto de túnel, lo que pronto demostró que Eddington tenía razón cuando se mantenía en sus trece, y al mismo tiempo no se puede encontrar una muestra más clara de la interdependencia entre las distintas disciplinas científicas. Sólo se pudo avanzar en el conocimiento del funcionamiento interno de las estrellas cuando empezaron a conocerse las propiedades cuánticas de entidades como los protones.

Pero incluso Atkinson y Houtermans, como ya hemos visto, seguían sosteniendo en 1928 que el Sol era rico en elementos pesados. Sin embargo, precisamente en la época en que estaban realizando sus cálculos, la espectroscopia llegó a ser los bastante sofisticada como para proyectar una sombra de duda sobre su tesis. En 1928, la astrónoma de origen británico Cecilia Payne (posteriormente Cecilia Payne Gaposchkin, 1900-1979) estaba trabajando para su tesis doctoral en el Radcliffe College, bajo la supervisión de Henry Norris Russell. Utilizando la espectroscopia, descubrió que en la composición de las atmósferas estelares predomina el hidrógeno, un resultado tan sorprendente que, cuando se publicó, Russell insistió en que Cecilia debía incluir una advertencia en la que se especificara que las características espectroscópicas observadas no podían entenderse realmente como algo que implicara que las estrellas están hechas de hidrógeno, sino que tendrían que deberse a algún tipo de comportamiento peculiar del hidrógeno en condi-

ciones estelares, un comportamiento que de alguna manera acrecentaría la presencia del hidrógeno en los espectros. Sin embargo, más o menos al mismo tiempo, el alemán Albrecht Unsöld (1905-1995) y el joven astrónomo irlandés William McCrea (1904-1999), cada uno por su lado, descubrieron que la predominancia de las líneas del hidrógeno en los espectros estelares indica que la presencia de los átomos de hidrógeno en las atmósferas de las estrellas es cuantitativamente un millón de veces más que la de todos los átomos de cualesquiera otros elementos en conjunto.

CÓMO BRILLAN LAS ESTRELLAS: EL PROCESO DE FUSIÓN NUCLEAR

Todos estos trabajos, que confluyeron a finales de la década de 1920, marcaron el comienzo del desarrollo de los conocimientos relativos a las causas por las cuales las estrellas brillan continuamente. Todavía tuvieron que transcurrir varios años antes de que los astrofísicos fueran capaces de concretar cuáles eran las interacciones nucleares más probables que podrían explicar este proceso, y aún haría falta un poco más de tiempo para que pudieran calibrar exactamente en qué proporción predomina el hidrógeno en la composición del universo visible. En parte, esto se debió a una desafortunada coincidencia. En la década de 1930, cuando los astrofísicos desarrollaron modelos matemáticos para describir la estructura interna de las estrellas con más detalle, descubrieron que estos modelos funcionaban —en el sentido de que predecían la existencia de bolas de gas caliente con el mismo tipo de tamaño, temperatura y masa que las estrellas— tanto si la composición de los objetos calientes es aproximadamente dos tercios de elementos pesados y un tercio de hidrógeno (o una mezcla de hidrógeno y helio), como si su composición es al menos un 95 por 100 de hidrógeno y helio, con tan sólo un pequeño vestigio de elementos pesados. Con

cualquiera de los dos tipos de mezcla, pero ninguna otra, las propiedades de las bolas calientes de gas que predicen las ecuaciones coincidirían con las de las estrellas reales. Después de haber constatado que existe más que un pequeño vestigio de hidrógeno dentro de las estrellas, al principio los astrofísicos se decidieron inmediatamente por la opción que contemplaba los dos tercios de elementos pesados, lo que significa que durante casi una década se concentraron en investigar las interacciones en las que los protones excavan un túnel en los núcleos pesados. Por fin descubrieron y conocieron detalladamente los procesos que pueden convertir el hidrógeno en helio, y sólo entonces constataron que los elementos pesados son escasos en las estrellas y que el hidrógeno y el helio juntos constituyen el 99 por 100 de la materia estelar.

Como sucede a menudo con las teorías científicas cuyo momento ha llegado, las interacciones cruciales implicadas en los procesos de fusión nuclear que hacen que las estrellas sigan brillando fueron identificadas de manera independiente por distintos investigadores aproximadamente al mismo tiempo. Las aportaciones más importantes llegaron a finales de la década de 1930 y fueron las del científico de origen alemán Hans Bethe, que trabajaba entonces en la Cornell University, y las de Cari von Weizsacker (1912-), que trabajaba en Berlín. Estos investigadores identificaron dos procesos que podían tener lugar a unas temperaturas que, según se sabía, existían dentro de las estrellas, y que permitían que unos procesos cuánticos, como el efecto de túnel, convirtieran hidrógeno en helio, con la correspondiente liberación de energía. Uno de estos procesos, conocido como la cadena protón-protón, es la interacción que predomina en estrellas como el Sol. En este proceso se juntan dos protones, expulsando un positrón, para formar un núcleo de deuterio (hidrógeno pesado).[17] Cuando otro protón se fusiona con este núcleo, forma helio-3 (dos protones más un neutrón),

y cuando dos núcleos de helio-3 se fusionan y expulsan dos protones, el resultado es un núcleo de helio-4 (dos protones más dos neutrones). El segundo proceso opera con más efectividad a las temperaturas ligeramente más altas que se dan en el centro de las estrellas cuya masa es al menos una vez y media la masa del Sol; y en muchas estrellas funcionan ambos procesos. Este segundo proceso, el ciclo del carbono, opera en un ciclo cerrado y necesita la presencia de unos pocos núcleos de carbono, con unos protones haciendo el efecto de túnel en estos núcleos, tal como Atkinson y Houtermans sugirieron. Dado que este proceso es un ciclo cerrado, estos núcleos pesados emergen al final del ciclo tal como estaban al principio, y lo que hacen en realidad es actuar como catalizadores. El ciclo comienza con un núcleo de carbono-12, al que la adición de un protón convierte en un núcleo inestable de nitrógeno-13. Luego, este núcleo inestable emite un positrón y se convierte en carbono-13.[18] Añadiendo un segundo protón se consigue nitrógeno-14, mientras que la adición de un tercer protón al nitrógeno-14 forma un núcleo inestable de oxígeno-15, que emite un positrón para convertirse en nitrógeno-15. Ahora llegamos a la escena final: con la adición de un cuarto protón, el núcleo emite una partícula alfa completa y se convierte de nuevo en carbono-12, que era el ingrediente inicial. Pero una partícula alfa es sencillamente un núcleo de helio-4. Una vez más, el efecto resultante es que cuatro protones se han convertido en un solo núcleo de helio, al tiempo que se ha emitido un par de positrones y mucha energía durante todo el proceso.

La identificación de estos procesos tuvo lugar poco antes del comienzo de la segunda guerra mundial, con lo cual los avances posteriores en el conocimiento de los funcionamientos internos de las estrellas tuvieron que esperar hasta el restablecimiento de unas condiciones de normalidad a finales de la década de 1940. Sin embargo, estos estudios se beneficiaron enton-

ces enormemente del esfuerzo bélico por comprender las interacciones nucleares, realizado en el marco de la investigación sobre armas atómicas y el desarrollo de los primeros reactores nucleares. Cuando se desclasificó la información correspondiente, ésta ayudó a los astrofísicos a calcular las velocidades a las que podrían producirse interacciones como las que hemos descrito en el interior de las estrellas. Además, después de que los trabajos de Alpher, Herman y Gamow pusieran de manifiesto el problema de los «huecos sin masa» para la fabricación de elementos más pesados paso a paso a partir del hidrógeno y el helio, en la década de 1950 varios astrónomos se dedicaron a estudiar el problema de la fabricación de elementos pesados (que, al fin y al cabo, tenían que venir de algún sitio) en el interior de las estrellas. Una de las teorías que se barajaron fue la posibilidad de que tres núcleos de helio-4 (tres partículas alfa) pudieran fusionarse prácticamente al mismo tiempo, para formar un núcleo estable de carbono-12, sin tener que formar el altamente inestable berilio-8 como paso intermedio. Quien aportó la idea crucial fue el astrónomo británico Fred Hoyle en 1953. Lo mismo que la física «clásica» afirmaba que dos protones no podían fusionarse en las condiciones existentes en el interior de una estrella como el Sol, las nociones más elementales de la física nuclear dicen que las interacciones «triple-alfa» podrían ocurrir, pero serían demasiado escasas para fabricar cantidades suficientes de carbono durante el tiempo de vida de una estrella. En la mayoría de los casos, estas colisiones triples lanzarían las partículas en distintas direcciones, en vez de combinarlas en un solo núcleo.

EL CONCEPTO DE «RESONANCIAS»

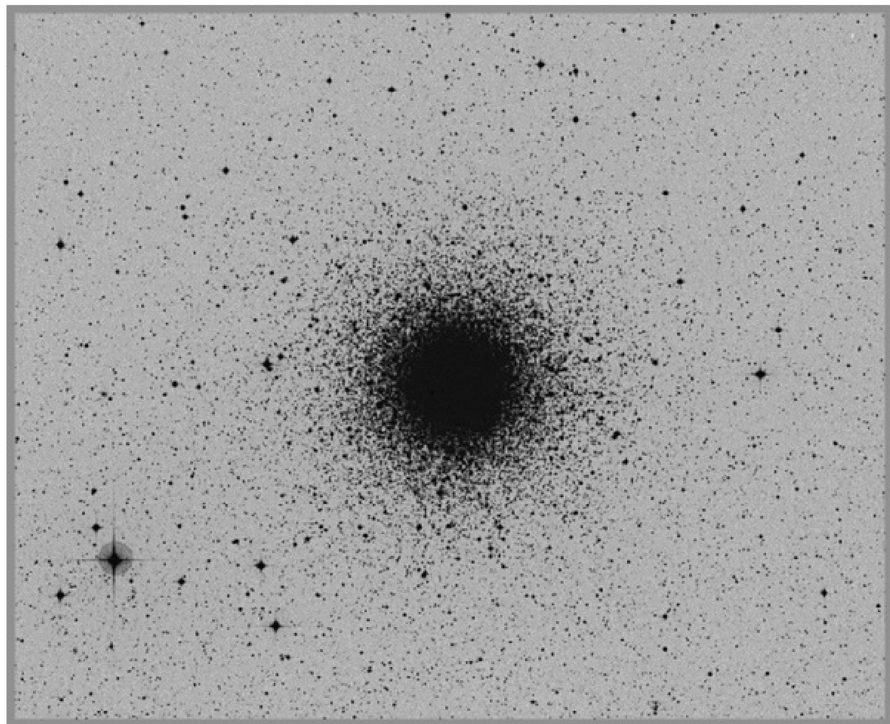
El enigma de la fusión de los protones se resolvió mediante el efecto túnel en el marco de la física cuántica; dado que no

había otras evidencias, salvo el hecho de que el carbono existe, Hoyle planteó una solución relativamente consistente al enigma de las interacciones «triple-alfa»: que el núcleo de carbono-12 debía poseer una propiedad conocida como resonancia, que aumentaba considerablemente la probabilidad de que se fusionaran tres partículas alfa. Estas resonancias son estados de energía superior a la habitual. Si la energía básica del núcleo se compara con la nota fundamental que suena en una cuerda de guitarra, las resonancias se pueden comparar con notas más altas tocadas en la misma cuerda, donde sólo ciertas notas (ciertos armónicos) son posibles. No había nada misterioso en la idea de las resonancias cuando Hoyle planteó esta sugerencia —pero no había modo de calcular por adelantado qué resonancias debería tener el carbono-12, por lo que, para que el truco funcionara, el carbono-12 debía tener una resonancia con una cierta energía muy concreta, correspondiente a una nota muy pura—. Hoyle persuadió a Willy Fowler (1911-1995), un físico experimental que trabajaba en Caltech, de que debía realizar experimentos para comprobar la existencia de dicha resonancia en el núcleo de carbono-12. Los resultados fueron exactamente los que Hoyle había predicho. La existencia de esta resonancia hace posible que tres partículas alfa se fusionen suavemente, en vez de chocar y salir disparadas en distintas direcciones como resultado del impacto. Esto crea un núcleo muy energético de carbono-12, que luego irradia su exceso de energía y se estabiliza en el nivel de energía básico (conocido como estado fundamental). Fue el descubrimiento crucial que explicaba cómo pueden formarse elementos más pesados que el helio dentro de las estrellas.[19] Si se dispone de núcleos de carbono con los que trabajar, es posible formar elementos más pesados añadiendo más partículas alfa (yendo desde el carbono-12 al oxígeno-16, para pasar luego de éste al neón-20, y así sucesivamente) o por el procedimiento de adición de pro-

tones, como una alimentación gota a gota, tal como plantearon Atkinson y Houtermans, o, en un contexto diferente, Alpher y Herman (este tipo de proceso funciona también en el ciclo del carbono). Hoyle, Fowler y sus colegas de origen británico Geoffrey Burbidge (1925-) y Margaret Burbidge (1922-) ofrecieron la versión definitiva sobre este modo de formación de los elementos en el interior de las estrellas en un informe publicado en 1957.[20] Basándose en este trabajo, los astrofísicos pudieron hacer modelos detallados del funcionamiento interno de las estrellas, y, comparando estos modelos con las observaciones de estrellas reales, lograron determinar los ciclos vitales de las estrellas y averiguar, entre otras cosas, las edades de las estrellas más antiguas de nuestra galaxia.

Este conocimiento de los procesos de fusión nuclear que actúan dentro de las estrellas explicaba cómo se pueden fabricar todos los elementos, hasta llegar al hierro, a partir del hidrógeno y el helio producidos en el *Big Bang*. Lo que es aún mejor, las proporciones de los distintos elementos que pueden producirse de este modo, según la predicción, se corresponde con las proporciones observadas en el universo en general —la cantidad de carbono en relación con la de oxígeno, o la de neón en relación con la de calcio, o cualesquiera otras—. Pero lo que no se puede explicar es la existencia de elementos más pesados que el hierro, porque los núcleos del hierro son la forma más estable de la materia común, con el mínimo de energía. Para producir núcleos de elementos aún más pesados —como el oro, el uranio o el plomo— se ha de suministrar energía para forzar a los núcleos a fusionarse. Eso sucede cuando las estrellas que tienen bastante más masa que el Sol llegan al final de sus vidas y se les agota el combustible nuclear que puede generar calor (por el tipo de interacciones que acabamos de describir) para mantenerlas en un bloque. Cuando su combustible se agota, estas estrellas se hunden espectacularmente sobre sí mismas y,

mientras lo hacen, se liberan unas enormes cantidades de energía gravitatoria que se convierten en calor. Uno de los efectos es que la estrella brilla durante unas pocas semanas, con tanto brillo como una galaxia completa de estrellas ordinarias, cuando se convierte en una supernova; otro efecto es que el fenómeno aporta energía para fusionar núcleos y formar los elementos más pesados, y un tercer efecto es potenciar una enorme explosión en la que la mayor parte de la materia de la estrella, incluidos los elementos pesados, se dispersa por el espacio interestelar para formar parte de la materia prima que formará nuevas estrellas, planetas y quizás también seres humanos. En las décadas de 1960 y 1970, muchos científicos se dedicaron a desarrollar los modelos teóricos que describen todos estos fenómenos, realizando observaciones de supernovas (que son acontecimientos bastante poco frecuentes) en otras galaxias. Posteriormente, en 1987, se vio la explosión de una supernova en las cercanías de nuestra galaxia, concretamente en la Gran Nube de Magallanes —la supernova más próxima a nosotros que se ha visto desde la invención del telescopio astronómico —. Con una batería de telescopios modernos enfocando este acontecimiento durante meses, analizando todos sus detalles mediante observaciones en todas las longitudes de onda posibles, se vio que los procesos que se desarrollaban en esta supernova encajaban muy bien con las predicciones de aquellos modelos, colocando eficientemente en su lugar la última pieza que completaba nuestro conocimiento de los aspectos básicos relativos al funcionamiento de las estrellas. Para aquellos astrónomos que habían visto cómo se desarrollaba este conocimiento a lo largo de un intervalo de tiempo equivalente a la duración de una vida humana, estos fueron los descubrimientos más importantes y emocionantes en relación con el origen de los elementos y, además, confirmaban que el modelo teórico es en gran medida correcto.



41. Imagen óptica (en negativo) del conglomerado estelar globular NGC 362.

El CHON y el lugar de la especie humana en el universo

Esto nos lleva a lo que es, desde mi punto de vista, el descubrimiento más profundo en toda la historia del esfuerzo científico. Los astrónomos pueden calcular con gran precisión cuánto material de distintos tipos se fabrica dentro de las estrellas y queda disperso por el universo después de la explosión de las supernovas y tras otros estallidos estelares de menor envergadura. Utilizando la espectroscopia, pueden confirmar estos cálculos midiendo la cantidad de los diferentes tipos de materiales contenidos en las nubes de gas y polvo que se encuentran en el espacio, es decir, la materia prima a partir de la cual se forman las nuevas estrellas y los nuevos sistemas planetarios. Lo que descubren es que, además del helio, que es un gas inerte que no

interviene en las reacciones químicas, los cuatro elementos más frecuentes en el universo son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, que se designan en conjunto mediante el acrónimo CHON. Se trata de una verdad definitiva que revelada a través de un proceso de investigación que comenzó cuando Galileo dirigió por primera vez su telescopio hacia el cielo, y ha finalizado con las observaciones de la superno va de 1987. Otra línea de investigación —de la que se pensó durante siglos que no parecía tener relación con el estudio científico de las estrellas— comenzó un poco antes, cuando Vesalio comenzó a situar el estudio del cuerpo humano en un nivel científico. La verdad última revelada a lo largo de esta línea de investigación, y que culminó con la investigación del ADN en la década de 1950, es la ausencia de pruebas que justifiquen la existencia de una fuerza vital específica, pero también es la constatación de que toda la vida existente sobre la Tierra, incluida la vida humana, está basada en procesos químicos, y los cuatro elementos más comunes que intervienen en esta química de la vida son el hidrógeno, el carbono, el oxígeno y el nitrógeno. Estamos hechos precisamente de las materias primas que son más fáciles de encontrar en el universo. Esto implica que la Tierra no es un lugar especial y que las formas de vida basadas en el CHON pueden darse con gran probabilidad en todo el universo, no sólo en nuestra galaxia, sino también en otras. Definitivamente la humanidad queda fuera de cualquier lugar especial dentro del universo y se completa así el proceso que comenzó con Copérnico y *De Revolutionibus*. La Tierra es un planeta corriente que gira en órbita alrededor de una estrella corriente en los arrabales de una galaxia de tipo medio. Nuestra galaxia contiene cientos de miles de millones de estrellas y hay cientos de miles de millones de galaxias en el universo visible, todas ellas llenas de estrellas parecidas al Sol y entrelazadas con nubes de gas y polvo ricas en CHON. Nada se podría añadir ya para descartar la

idea prerrenacentista de que la Tierra estaba en el centro del universo, con el Sol y las estrellas girando alrededor de ella, y la humanidad como pináculo único de la creación y cualitativamente diferente de las formas «menores» de vida.

Hacia lo desconocido

¿Significan estos descubrimientos, como algunos han sugerido, que la ciencia está a punto de llegar a su final? Ahora que sabemos cómo funcionan la vida y el universo, ¿queda algo más, que no sea completar algunos detalles? Creo que sí. Incluso el mero hecho de completar los detalles va a ser una larga tarea, pero la ciencia como tal está experimentando actualmente un cambio cualitativo. La analogía que he utilizado anteriormente, y sobre la cual no puedo añadir nada mejor, es la del juego del ajedrez. Un niño pequeño puede aprender las reglas del juego —incluso las más complicadas, como el movimiento del caballo—. Pero esto no convierte al niño en un gran maestro del ajedrez, e incluso el maestro más grande que haya existido, nunca pretendería saber todo lo que hay que saber sobre este juego. Cuatro siglos y medio después de la publicación de *De Revolutionibus*, nos encontramos en la misma situación que ese niño pequeño que acaba de aprender las reglas del juego. Estamos justo comenzando a hacer nuestros primeros intentos de jugar, con inventos tales como la ingeniería genética y la inteligencia artificial. Quién sabe lo que nos podrá deparar el futuro durante los próximos cinco siglos, por no hablar de los próximos cinco milenios.

CODA: EL PLACER DE DESCUBRIR

La ciencia es una actividad personal. Salvo unas pocas excepciones, a lo largo de la historia los científicos han empleado sus fuerzas, no por deseo de gloria o de recompensa material, sino para satisfacer su propia curiosidad por saber cómo funciona el mundo. Algunos, como ya hemos visto, han llevado esto a tales extremos que se han guardado sus descubrimientos para sí mismos, felices de saber que habían encontrado la solución de algún enigma concreto, pero sin sentir necesidad de jactarse de sus logros. Aunque cada científico —y cada generación de científicos— existe y trabaja en el contexto de su época, construyendo sobre lo que se ha hecho antes y con ayuda de la tecnología que tiene a su alcance, sin embargo, su contribución la realiza como individuo. Por consiguiente, me ha parecido natural utilizar un planteamiento esencialmente biográfico para la historia de la ciencia (al menos, en mi primer intento de abordar esta historia), con la esperanza de sacar a la luz lo que hace que un científico palpite y también de poner de manifiesto cómo un avance científico conduce a otro posterior. Soy consciente de que éste no es el planteamiento que prefieren los historiadores hoy en día y que cualquier historiador profesional que haya leído el libro hasta esta página puede acusarme de ser anticuado e incluso reaccionario. Pero, si soy anticuado, es porque he optado por serlo, no porque no sea consciente de que no voy con los tiempos. También sé que en cuanto a modos de plantear el estudio de la historia, hay tantos como historiadores, y cada planteamiento puede arrojar nueva luz sobre el tema. Pocos historiadores, si es que lo hace alguno, afirmarían

que un punto de vista personal sobre la historia, o una interpretación de ésta, pone de manifiesto «la» verdad sobre la historia, del mismo modo que una sola instantánea de una persona tampoco revela todo lo relativo a esa persona. Pero quizá haya algo en mi planteamiento de la historia que proporcione materia de reflexión incluso a los profesionales.

Aunque el proceso de hacer ciencia es una actividad personal, la ciencia en sí misma es esencialmente impersonal. Trata de verdades absolutas y objetivas. Una confusión entre el proceso de hacer ciencia y la ciencia como tal ha creado el mito popular del científico como un ser de sangre fría que es una máquina lógica. Pero los científicos pueden ser personas de sangre caliente, ilógicos e incluso dementes, aunque se dediquen a la búsqueda de la verdad última. Según ciertos criterios, Newton era un loco, tanto en su fuerte obsesión por una serie de intereses (la ciencia, la alquimia, la religión), como en la intensidad de sus venganzas personales, mientras que Henry Cavendish era decididamente un individuo raro. Por lo tanto, en este libro es importante establecer la diferencia entre lo que es subjetivo, y por lo tanto está abierto al debate, y lo que es objetivo y una verdad indiscutible.

No pretendo que esto sea la última palabra en la historia de la ciencia —ningún libro puede serlo—. Es subjetivo, como todas las historias, pero está escrito desde la perspectiva de alguien que ha estado implicado personalmente en la investigación científica, y no por un historiador profesional, lo cual tiene ventajas y también desventajas. La idea más importante que aporta este libro, y espero que haya quedado claro en él, es que rechazo la idea kuhneana de la «revoluciones» dentro de la ciencia y veo el desarrollo del tema como un proceso esencialmente incremental que avanza paso a paso. Pienso que las dos claves del progreso científico son el toque personal y el avance gradual construyendo sobre lo que se ha hecho anteriormente.

Son las personas las que hacen la ciencia, no la ciencia la que hace a las personas, y mi propósito ha sido hablar sobre las personas que han hecho la ciencia y sobre cómo la han hecho. En relación estrecha con este punto de vista sobre la ciencia está la idea de que, hasta cierto punto, la ciencia está divorciada de las agitaciones económicas y sociales que se producen en el mundo en general, y también que su objetivo es realmente la búsqueda de la verdad objetiva.

Los historiadores o los sociólogos que carecen de formación o experiencia con respecto a la investigación científica plantean a veces que la verdad científica no es más válida que la verdad artística, y que (por decirlo de una forma basta) la teoría general de la relatividad de Einstein podría pasarse de moda igual que la pintura de los artistas Victorianos se pasó de moda con el tiempo. Esto no es cierto en absoluto. Cualquier descripción del universo que supere el alcance de la teoría de Einstein debe, por una parte, ir más allá de las limitaciones de esta teoría y, además, incluir en sí misma todos los aciertos de la propia teoría general, del mismo modo que la teoría general incluye en sí misma la teoría de la gravedad de Newton. Nunca habrá una descripción acertada del universo que afirme que la teoría de Einstein está equivocada en ninguno de los sectores en que ha sido ya verificada. Es una verdad objetiva y basada en los hechos, por ejemplo, que la luz «se desvía» en cierta medida cuando pasa cerca de una estrella como el Sol, y la teoría general de la relatividad siempre podrá decir cuánto se desvía. A un nivel más sencillo, como muchos otros hechos científicos, la ley universal de la gravedad es una verdad definitiva, pero ningún relato histórico sobre cómo fue descubierta podrá ser «la» verdad del mismo modo que lo es la propia ley. Nadie sabrá nunca hasta qué punto las ideas de Newton sobre la gravedad estuvieron influidas por la observación de la caída de una manzana; en la época en que contó esta historia, es posible que el propio

Newton no pudiera recordar los detalles correctamente. Pero lo que todos podemos saber es cómo era la ley de la gravedad que Newton descubrió. Por lo tanto, mi relato es personal y subjetivo en la interpretación de las pruebas relativas a cómo se descubrieron las verdades científicas; pero es impersonal y objetivo en la descripción de lo que son esas verdades científicas. El lector estará o no de acuerdo con mi opinión de que Newton difamó a Robert Hooke; pero, en cualquier caso, tendrá que aceptar la verdad de la ley de la elasticidad que formuló Hooke.

Si es necesario poner un ejemplo específico del argumento inverso, es decir, de cómo es imposible distorsionar la verdad científica para que se adecúe al modo en que nos gustaría que fuera el mundo, no hay más que mencionar la distorsión del estudio de la genética bajo el régimen estalinista en la URSS hace medio siglo. Trofim Denisovich Lysenko (1898-1976) consiguió favores e influencia durante el mencionado régimen porque sus teorías sobre genética y herencia ofrecían un punto de vista políticamente correcto con respecto al mundo biológico, mientras que los principios mendelianos de la genética estaban considerados incompatibles con los principios del materialismo dialéctico. Puede que lo fueran, pero el hecho sigue siendo que la genética mendeliana proporciona una buena descripción del modo en que actúa la herencia, mientras que la genética de Lysenko no lo hace y tuvo unas repercusiones desastrosas a un nivel muy práctico, dada la influencia que tuvo Lysenko en la agricultura soviética.

Uno de los argumentos más extraños que he visto plantear —aparentemente en serio— es que utilizar una palabra como *gravedad* para referirse a la causa de la caída de una manzana de un árbol es algo no menos místico que invocar la «voluntad divina» para explicar por qué cae la manzana, ya que la palabra *gravedad* no es más que una etiqueta. Ciertamente lo es —del mismo modo que las palabras *Quinta Sinfonía de Beethoven* no

son música, sino sólo una etiqueta que indica el título de una composición musical; también una etiqueta alternativa, como los símbolos del alfabeto Morse para expresar la letra *V*, se podría utilizar igualmente para designar la mencionada Quinta Sinfonía. Los científicos son muy conscientes de que las palabras sólo son etiquetas que utilizamos por conveniencia, y de que una rosa, aunque la llamemos de otra manera, olerá igual de bien. Esta es la razón por la que eligieron deliberadamente una palabra sin sentido, *quark*, para etiquetar una entidad fundamental de la teoría de partículas, y también la razón por la que utilizan nombres de colores (rojo, azul y verde) para identificar distintas clases de quarks, no porque éstos sean de distintos colores. La diferencia entre la descripción científica del modo en que caen las manzanas y la descripción mística del modo en que caen las manzanas es que, sea cual sea el nombre que se dé al fenómeno, en términos científicos se puede describir mediante una ley exacta (en este caso la ley de la inversa del cuadrado o ley de la gravedad universal), y la misma ley se puede aplicar a la caída de la manzana de un árbol, al modo en que la Luna se mantiene en órbita alrededor de la Tierra y así sucesivamente en todo el universo. Para un místico, no hay razón por la cual debamos pensar que el modo en que una manzana cae de un árbol tenga alguna relación con, por ejemplo, el modo en que un cometa se mueve al pasar cerca del Sol. Pero, la palabra *gravedad* es simplemente una expresión abreviada para todo el conjunto de ideas englobadas en los *Principia* de Newton y en la teoría general de la relatividad de Einstein. Para un científico la palabra gravedad evoca un rico mosaico de teorías y leyes, del mismo modo que para el director de una orquesta sinfónica las palabras *Quinta Sinfonía de Beethoven* evocan una rica experiencia musical. No es la etiqueta lo que importa, sino la ley universal que subyace y que da un poder de predicción a la ciencia. Podemos afirmar con seguridad que los planetas (y los

cometas) que giran en órbita alrededor de las estrellas están también bajo la influencia de la ley de la inversa del cuadrado, tanto si esa ley se debe a la «gravedad», como si se debe a la «voluntad de Dios»; además, podemos estar seguros de que los seres inteligentes que puedan estar viviendo en esos planetas obtendrán mediciones que respondan a la misma ley de la inversa del cuadrado, aunque indudablemente utilizarán un nombre diferente para referirse a ella.

No es necesario insistir más en este punto. Si la ciencia mantiene tan bien su coherencia es porque en ella hay verdades definitivas. Además, lo que motiva a los grandes científicos no es la sed de fama o fortuna (aunque esto puede ser un atractivo aliciente para los que no son tan grandes como los grandes científicos), sino lo que Richard Feynman llamó «el placer de descubrir cosas», un placer tan satisfactorio que muchos de aquellos grandes científicos, desde Newton a Cavendish y desde Charles Darwin hasta el propio Feynman, ni siquiera se preocupaban por publicar sus hallazgos, salvo cuando sus amigos les presionaban para que lo hicieran. Este placer difícilmente existiría si no hubiera verdades que descubrir.

BIBLIOGRAFÍA

Adhémar, J. A., *Révolutions de la mer,* publicado por el autor, París, 1842.

Agassiz, Elisabeth Cary, *Louis Agassiz, his life and correspondence,* Houghton Mifflin & Co, Boston, 1886, 2 vols.

Alpher, Ralph y Robert Herman, *Genesis of the Big Bang,* OUP, Oxford, 2001.

Armitage, Angus, *Edmond Halley,* Nelson, Londres, 1966.

Asimov, Isaac, *Asimov's New Guide to Science,* Penguin, Londres, 1987. (Hay trad. cast.: *Introducción a la ciencia,* Orbis, Barcelona, 1985, 2 vols).

Aubrey, John, *Brief Lives,* Clarendon Press, Oxford, 1898, 2 vols.

Baierlein, Ralph, *Newton to Einstein,* CUP, Cambridge, 1992.

Barlow, Nora, ed., *The Autobiography of Charles Darwin, 1809-1882, with original omissions restored,* William Collins, Londres, 1958.

Berger, A. J., J. Imbrie, J. Hais, G. Kukla. y B. Saltzan, eds., *Milankovitch and Climate,* Reidel. Dordrecht, 1984.

Berkson, W, *Fields of Force,* Routledge, Londres, 1960. (Hay trad. cast.: *Las teorías de los campos de fuerza: desde Faraday hasta Einstein,* Alianza, Madrid, 1985, 2.ª ed).

Berlinski, David, *Newton's Gift,* The Free Press, Nueva York, 2000.

Berry, A. J., *Henry Cavendish,* Hutchinson, Londres, I960.

Biagioli, Mario, *Galileo,* Courtier, University of Chicago Press, Chicago, 1993.

Blackett, P. M. S., E. Bullard y S. K. Runcorn, *A Symposium on Continental Drift,* Royal Society, Londres, 1965.

Bragg, W, y G. Porter, eds., *The Royal Institution Library of Science,* vol. 5, Elservier, Amsterdam, 1970.

Brown, S. C., *Benjamin Thompson,* Count Rumford, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1979.

Browne, Janet, *Charles Darwin: voyaging,* Jonathan Cape, Londres, 1995.

Bruno, Leonard C., *The Landmarks of Science,* Facts on File, Nueva York, 1989.

Campbell, John, *Rutherford,* AAS Publications, Christchurch, Nueva Zelanda, 1999.

Caroe, G. M., *William Henry Bragg,* CUP, Cambridge, 1978.

Cercignani, Carlo, *Ludwig Boltzmann,* OUP, Oxford, 1998.

Chandrasekhar, S., *Eddington,* CUP, Cambridge, 1983.

Christianson, John Robert, *On Tycho's Island,* CUP, Londres, 2000.

Clerk Maxwell, James, *The Scientific Papers of J. Clerk Maxwell,* ed. W. D. Niven, CUP, Cambridge, 1890.

Close, Frank, *Lucifer's Legacy,* OUP, Oxford, 2000.

Conrad, Lawrence 1., Michael Neve, Vivian Nutton, Roy Porter y Andrew Wear, *The Western Medical Tradition: 800 BC to AD 1800,* CUP, Cambridge, 1995.

Cook, Alan, *Edmond Halley,* OUP, Oxford, 1998.

Croll, James, *Climate and Time in their Geological Relations,* Daldy, Isbister & Co, Londres, 1875.

Crowther, J. G., *British Scientists of the Nineteenth Century,* Kegan Paul, Londres, 1935.

—, *Founders of British Science,* Cresset Press, Londres, 1960.

—, *Scientists of the Industrial Revolution,* Cresset Press, Londres, 1962.

Dampier, William, *A History of Science,* 3rd ed., CUP, Cambridge, 1942. (Hay trad. cast.: *Historia de la ciencia y sus relaciones con la filosofía y la religión,* Tecnos, Madrid, 1997, 3.ª ed).

Darwin, Charles, *The Origin of Species by Means of Natural Selection,* Pelican, Londres, 1968, 1.ª edición de 1859 con material adicional; reimpreso en Penguin Classics, 1985. (Hay trad. cast.: *El origen de las especies,* Planeta De Agostini, Barcelona, 1996).

—, y Alfred Wallace, *Evolution by Natural Selection,* CUP, Cambridge, 1942.

Darwin, Erasmus, *Zoonomia,* Part I, J. Johnson, Londres, 1794.

Darwin, Francis, ed., *The Life and Letters of Charles Darwin,* John Murray, Londres, 1887. Versión abreviada: *The Autobiography of Charles Darwin and Selected Letters,* Dover, Nue-vaYork, 1958. (Hay trad. cast.: *Charles Darwin: autobiografía y cartas escogidas,* 2 vols., Alianza, Madrid, 1984, 2.ª ed).

—, ed., *The Foundations of the Origin of Species: two essays written in 1842 and 1844 by Charles Darwin,* CUP, Cambridge, 1909.

Dawkins, Richard, *The Blind Watchmaker,* Longman, Harlow, 1986. (Hay trad. cast.: *El relojero ciego,* Labor, Barcelona, 1989).

Descartes, René, *Discourse on Method and the Meditations,* traducción de F. E. Sutcliffe, Penguin, Londres, 1968. (Hay trad. cast.: *Discurso del método; Meditaciones metafísicas,* RBA, Barcelona, 2002).

Desmond, Adrian, y James Moore, *Darwin,* Michael Joseph, Londres, 1991.

—, Desmond, Adrian, *Huxley,* Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.

Drake, Ellen, *Restless Genius: Robert Hooke and his earthly thoughts,* OUP, Nueva York, 1996. Drake, Stillman, *Galileo at Work,* Dover, Nueva York, 1978.

—, Galileo, OUP, Oxford, 1980. (Hay trad. cast.: *Galileo,* Alianza, Madrid, 1983). Eddington, A. S., *The Internal Constitution of the Stars,* CUP, Cambridge, 1926.

—, The Nature of the Physical World, CUP, Cambridge, 1928. (Hay trad. cast.: *La naturaleza del mundo físico,* Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1945).

Espinasse, Margaret, *Robert Hooke,* Heinemann, Londres, 1956.

Evelyn, John, *Diary* (ed. E. S. de Beer), OUP, Londres, 1959.

Everitt, C. W. E, *James Clerk Maxwell,* Scribner's, Nueva York, 1975.

Fahie, J. J., *Galileo: his life and work,* John Murray, Londres, 1903.

Fellows, Otis, y Stephen Milliken, *Buffon,* Twayne, Nueva York, 1972.

Ferry, Georgina, *Dorothy Hodgkin,* Granta, Londres, 1998.

Feynman, Richard, *QED: the strange theory of light and matter,* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey,

1985.

Fifield, Richard, ed., *The Making of the Earth,* Blackwell, Oxford, 1985. (Hay trad. cast.: *Formación de la tierra,* Pirámide, Madrid, 1987).

Flew, Antony, *Malthus,* Pelican, Londres, 1970.

Frangsmyr, Tore, ed., *Linnaeus: the man and his work,* University of California Press, Berkeley, 1983.

Galilei, Galileo, *Galileo on the World Systems* (abreviado y traducido de *Dialogue* by Maurice A. Finocchiaro), University of California Press, 1997.

Gamow, George, *The Creation of the Universe,* Viking, Nueva York, 1952. (Hay trad. cast.: *La creación del universo,* RBA, Barcelona. 1993).

Gass, G., Peter J. Smith, y R. C. L. Wilson, eds., *Understanding the Earth,* MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972, 2.ª ed. (Hay trad. cast.: *Introducción a las ciencias de la Tierra,* Reverté, Barcelona, 1980).

Geikie, J., *The Great Ice Age,* Stanford, Londres, 1894, 3.ª ed. (l.'ed. publicada por Isbister, Londres, 1874).

George, Wilma, *Biologist Philosopher: a study of the life and writings of Alfred Russell Wallace,* Abelard-Schuman, Nueva York, 1964.

Gilbert, William, *Loadstone and Magnetic Bodies, and on The Great Magnet of the Earth,* traducido de la edición de 1600 de *De Magnete,* por P. Fleury Mottelay, Bernard Quaritch, Londres, 1893.

Gillispie, C. C., *Pierre-Simon Laplace,* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1997.

Grand, H. E. Le, *Drifting Continents and Shifting Theories,* CUP, Cambridge, 1988. Greenaway, Frank, *John Dalton and the Atom,* Heinemann, Londres, 1966.

Gribbin, John, *In Search of Schrodinger's Cat,* Bantam, Londres, 1984.

—, *In Search of the Double Helix,* Penguin, Londres, 1995.

—, *In Search of the Big Bang,* Penguin, Londres, 1998.

—, *The Birth of Time,* Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1999. (Hay trad. cast.: *El nacimiento del tiempo: cómo medimos la edad del universo,* Paidós, Barcelona, 2000).

—, *Stardust,* Viking, Londres, 2000.

—, y Mary Gribbin, *Richard Feynman: a life in science,* Viking, Londres, 1994.

, y Jeremy Cherfas, *The First Chimpanzee,* Penguin, Londres, 2001.

—, *The Mating Game,* Penguin, Londres, 2001.

Gruber, Howard, *Darwin on Man,* Wildwood House, Londres, 1940. (Hay trad. cast.: *Darwin sobre el hombre: un estudio psicológico de la creatividad científica,* Alianza, Madrid, 1984).

Hager. Thomas, *Force of Nature: the life of Linus Pauling,* Simon & Schuster, Nueva York, 1995.

Hall, Marie Boas, *Robert Boyle and Seventeenth-Century Chemistry,* CUP. Cambridge, 1958. *, Robert Boyle on Natural Philosophy,* Indiana University Press, Bloomington, 1965.

Hall, Rupert, *Isaac Newton,* Blackwell, Oxford, 1992.

Hartley, Harold, *Humphry Davy,* Nelson, London, 1966.

Holmes, Arthur, *Principles of Physical Geology,* Nelson, Londres, 1944. (Hay trad. cast.: *Geología física,* Omega, Barcelona, 1987).

Hooke, Robert, *Micrographia,* Royal Society, Londres, 1665. (Hay trad. cast.: *Micrografia o Algunas descripciones fisiológicas de los cuerpos diminutos realizadas mediante cristales*

de aumento con observaciones y disquisiciones sobre ellas, Círculo de Lectores, Barcelona, 1995).

—, *The Posthumous Works of Robert Hooke* (ed. Richard Waller), Royal Society, Londres, 1705.

—, *The Diary of Robert Hooke* (eds. Henry Robinson y Walter Adams), Taylor & Francis, Londres, 1935.

Houston, Ken, ed., *Robert Boyle Reconsidered,* CUP, Cambridge, 1994.

Iltis, Hugo, *Life of Mendel,* Allen & Unwin, Londres, 1870.

Jordanova, L. J., *Lamarck,* OUP, Oxford, 1984.

Judson, Horace Freeland, *The Eighth Day of Creation,* Jonathan Caspe, Londres, 1979.

Jungnickel, C., y R. McCormmach. *Cavendish: the experimental life,* Bucknell University Press, Nueva Jersey, 1996.

Kedrov, F. B., *Kapitza: life and discoveries,* Mir, Moscú, 1984.

Kesten, Hermann, *Copernicus and his World,* Martin Seeker & Warburg, Londres, 1945.

Keynes, Geoffrey, *A Bibliography of Dr Robert Hooke,* Clarendon Press, Oxford, 1960.

King-Hele, Desmond, *Erasmus Darwin,* De La Mare, Londres, 1999.

Knight, David C., *Johannes Kepler and Planetary Motion,* Franklin Watts, Nueva York, 1962.

Köppen, W., y A. Wegener, *Die Klimate der Geologischen Vorzeit,* Borntraeger, Berlin, 1924.

Kragh, Helge, *Quantum Generations,* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1999.

Lagerkvist, Ulf, *DNA Pioneers and Their Legacy,* Yale University Press, New Haven, 1998. Lamb, H. H., *Climate: pre-*

sent, past and future, Methuen, Londres, vol. 1, 1972, vol. 2, 1977.

Larsen, E., *An American in Europe,* Rider, Nueva York, 1953.

Lavoisier, A. L., *Elements of Chemistry,* traducción de Robert Kerr, Dover, Nueva York, 1965; facsimile of 1790 edition. (Hay trad. cast.: *Elementos de historia natural y de química,* 3 vols., D. Antonio Espinosa, Segovia, 1793).

Lewis, Cherry, *The Dating Game,* CUP, Cambridge, 2000.

Lovelock, James, *Gaia,* OUP, Oxford, 1979. (Hay trad. cast.: *Gaia: una ciencia para curar el planeta.* Integral, Barcelona, 1992).

—, *The Ages of Gaia,* OUP, Oxford, 1988. (Hay trad. cast.: *Las edades de Gaia: una biografía de nuestro planeta vivo,* Tusquets, Barcelona, 2000, 3.ª ed).

Lurie, E., *Louis Agassiz,* University of Chicago Press, 1960.

Lyell, Charles, *Principles of Geology,* Penguin, Londres, 1997; publicado inicialmente en tres volúmenes por John Murray, Londres, 1830-1833.

—, *Elements of Geology,* John Murray, Londres, 1838. (Hay trad. cast.: *Elementos de geología,* Sociedad Geológica de España, Madrid, 1998).

Lyell, Katherine, ed., *Life, Letters and Journals of Sir Charles Lyell, Bart,* John Murray, Londres, 1881, 2 vols.

McCarty, Maclyn, *The Transforming Principle,* Norton, Nueva York, 1985. (Hay trad. cast.: *El principio transformador: Cómo se descubrió que los genes están hechos de DNA,* Reverté, Barcelona, 1988).

McKie, Douglas, *Antoine Lavoisier,* Constable, Londres, 1952.

McKinney, H. L., *Wallace and Natural Selection,* Yale University Press, New Haven, 1972. Manuel, Frank, *Portrait of Isaac Newton,* Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1968.

Marvin, Ursula, *Continental Drift,* Smithsonian Institution, Washington DC, 1973.

Mehra, Jagdish, *Einstein, Physics and Reality,* World Scientific, Singapore, 1999. Milankovitch, Milutin, *Durch feme Welten und Zeiten,* Kohler & Amalang, Leipzig, 1936.

Moore, Ruth, *Niels Bohr,* MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.

Ne'eman, Yuval, y Yoram Kirsh, *The Particle Hunters,* CUP, Cambridge, 1996, 2.ª ed.

North, J. D., *The Measure of the Universe,* OUP, Oxford, 1965.

Olby, Robert, *The Part to the Double Helix,* Macmillan, Londres, 1974. (Hay trad. cast.: *El Camino hacia la doble hélice,* Alianza Editorial. Madrid, 1991).

O'Malley, C. D., *Andreas Vesalius of Brussels 1514-1564,* University of California Press, Berkeley, 1964.

Osborn, Henry, *From the Greeks to Darwin,* Macmillan, Nueva York, 1894.

Outram, Dorinda, *Georges Courier,* Manchester University Press, Manchester, 1984.

Overbye, Dennis, *Einstein in Love,* Viking, Nueva York, 2000.

Owen, H. G., *Atlas of Continental Displacement: 200 million years to the present,* CUP, Cambridge, 1983.

Pais, Abraham, *Subtle is the Lord...,* OUP, Oxford, 1982. (Hay trad. cast.: *El Señor es sutil...: la ciencia y la vida de Albert Einstein,* Ariel, Barcelona, 1984).

—, *Inward Bound: of matter and forces in the physical world,* OUP, Oxford, 1986.

Pauling, Linus, y Peter Pauling, *Chemistry,* Freeman, San Francisco, 1975. (Hay trad. cast.: *Química general,* Aguilar, Madrid, 1977).

Pepys, Samuel, *The Shorter Pepys,* seleccionado y editado por Robert Latham, Penguin, Londres, 1987.

Pilkington, Roger, *Robert Boyle: father of chemistry,* John Murray, Londres, 1959.

Playfair, John, *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth* (reedición facsimilar de la de 1802, con introducción de George White), Dover, Nueva York, 1956.

Portugal, Franklin, y Jack Cohen, *A Century of DNA,* MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1977.

Principe, Lawrence, *The Aspiring Adept,* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1998.

Pullman, Bernard, *The Atom in the History of Human Thought,* OUP, Oxford, 1998.

Pyenson, Lewis, y Susan Sheets-Pyenson, *Servants of Nature,* HarperCollins, Londres, 1999.

Quinn, Susan, *Marie Curie,* Heinemann, Londres, 1995.

Raby, Peter, *Alfred Russel Wallace,* Chatto & Windus, Londres, 2001.

Raven, Charles E., *John Ray,* CUP, Cambridge. 1950.

Reston, James, *Galileo,* Cassell, Londres, 1994. (Hay trad. cast.: *Galileo: el genio y el hombre,* Ediciones B, Barcelona. 1996).

Ronan, Colin A., *The Cambridge Illustrated History of the World's Science,* CUP, Cambridge, 1983.

Rozental, S., ed., *Niels Bohr,* North-Holland, Amsterdam, 1967.

Rudnicki, Jósef, *Nicholas Copernicus,* Copernicus Quatercentenary Celebration Committee, Londres, 1943.

Sayre, Anne, *Rosalind Franklin & DNA,* Norton, Nueva York, 1978. (Hay trad. cast.: *Rosalind Franklin y el ADN,* horas y HORAS la editorial, Madrid, 1997).

Schneider, Stephen, y Randi Londer, *The Coevolution of Climate & Life,* Sierra Club, San Francisco, 1984.

Schrödinger, Erwin, *What is Life?* y *Mind and Matter,* CUP, Cambridge, 1967, edición colectánea de dos libros publicados por separado, respectivamente, en 1944 y 1958. (Hay trad. cast.: *La Mente y la materia,* Taurus, Madrid, 1958; *¿Qué es la vida?: el aspecto físico de la célula viva,* Tusquets, Barcelona, 1988, 3.ª ed).

Scott, J. E, *The Scientific Work of René Descartes,* Taylor & Francis, Londres, 1952.

Shapin, Steven, *The Scientific Revolution,* University of Chicago Press, Chicago, 1966. (Hay trad. cast.: *La Revolución científica: una interpretación alternativa,* Paidós, Barcelona, 2000).

Stachel, John, ed., *Einsteins Miraculous Year,* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1998. (Hay trad. cast.: *Einstein 1905: un año milagroso: cinco artículos que cambiaron la física,* Crítica, Barcelona, 2001).

Stafleu, Frans A., *Linnaeus and the Linneans,* A Oosthoek's Uitgeversmaatschappij NV, Utrecht, 1971.

Standage, Tom, *The Neptune File,* Allen Lane, Londres, 2000.

Thomson, G. P., *Thomson, J. J.,* Nelson, Londres, 1964.

Thrower, Norman, ed., *The Three Voyages of Edmond Halley,* Hakluyt Society, Londres, 1980.

Uffenbach, Conrad von, *London in 1710,* trans. and ed. W. H. Quarrell y Margaret Mare, Faber & Faber, Londres, 1934.

Wallace, Alfred Russel, *My Life,* Chapman & Hall, Londres; publicado originalmente en 2 vols. en 1905; primera edición revisada en un solo tomo, 1908.

Watson, James, «The Double Helix», en Gunther Stent, ed., *Double Helix* «critical edition», Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1981. (Hay trad.: *La doble hélice,* Plaza & Janés, Barcelona, 1978).

Wegener, Alfred, *The Origin of Continents and Oceans,* Metuen, Londres, 1967 (traducción de la 4.ª edición alemana publicada en 1929). (Hay trad. cast: *El origen de los continentes y océanos,* Pirámide, 1983).

Westfall, Richard, *Never at Rest: a biographv of Isaac Newton* UP, Cambridge, 1980.

—, *The Life of Isaac Newton,* CUP, Cambridge. 1993; es ésta una versión abreviada y más legible de *Never at Rest.* (Hay trad. cast.: *Isaac Newton, una vida,* Cambridge University Press. Cambridge, 1996).

White, Michael, *Isaac Newton: the last sorcerer,* Fourth Estate, Londres, 1997. (Hay trad. cast.: *Isaac Newton: La historia del gran matemático que cambió nuestra concepción del universo,* Ediciones SM, Madrid, 1990).

—, y John Gribbin, *Einstein: a life in science,* Simon & Schuster, Londres, 1993.

—, *Darwin: a life in science,* Simon & Schuster, Londres, 1995.

Whitehead, A. N., *Science and the Modern World,* CUP, Cambridge, 1927.

Whitfield, Peter, *Landmarks in Western Science,* British Library, Londres, 1999.

Williams. L. R, *Michael Faraday,* Chapman, Londres, 1965.

Wilson, David, *Rutherford,* Hodder & Stoughton, Londres, 1983.

Wilson, Edmund, *The Cell in Development and Inheritance,* Macmillan, Nueva York, 1896.

Wilson, Leonard, *Charles Lyell,* Yale University Press, New Haven, 1972.

Wright, Thomas, *An Original Theory of the Universe,* Chapelle, Londres, 1750; edición facsimilar editada por Michael Hoskin, Macdonald, Londres, 1971.

Yeats, W. B., «Among School Children» en, por ejemplo, *Selected Poetry,* ed. Timothy Webb, Penguin, Londres, 1991. (Hay trad. cast.: *Antología poética,* Siruela, Madrid, 1991).

Young, David, *The Discovery of Evolution,* CUP, Cambridge, 1992. (Hay trad. cast.: *El Descubrimiento de la evolución,* Ediciones del Serbal, Barcelona, 1998).

Zajonc, Arthur, *Catching the Light,* Bantam, Londres, 1993. (Hay trad. cast.: *Atrapando la luz: historia de la luz y de la mente,* Andrés Bello, Barcelona, 1996, 3.ª ed.).



JOHN GRIBBIN, se doctoró en astrofísica por la Universidad de Cambridge y en la actualidad es *visiting fellow* en astronomía en la Universidad de Sussex. Es, además, asesor del *New Sciencist*. Entre sus obras, grandes éxitos de ventas, destacan *En busca del gato de Schrödinger, El Punto Omega, En busca del* big bang*, Cegados por la luz: la vida secreta del Sol, En el principio, Diccionario del cosmos* (1997), *En busca de Susy* (2001), *Introducción a la ciencia* (2001) e *Historia de la ciencia* (2005).

Notas complementarias

[*] Los datos relativos a los libros que se mencionan en el texto aparecen en la bibliografía. <<

[*] *My father, by his continuall painfull practices, assisted with demonstrations mathematicall, was able, and sundry times hath, by proportionall glasses duely situate in convenient angles, not onely discovered things farre off, read letters, numbred peeces of money with the very coyne and superscription thereof cast by some of his freends on purpose upon downes in open fields but also seven miles off declared what hath been doone at that instant in private places.* <<

[*] En inglés, estos conductos se denominan Fallopian tubes, es decir «tubos de Fallopio», y no se respeta el término tuba utilizado por su descubridor, pero en castellano, al decir «trompas», se ha respetado bastante bien el símil que hizo Fallopio. Lo mismo se puede decir con respecto a las «trompas de Eustaquio», de las que se habla en la nota siguiente. (*N. de la t.*) <<

[*] Llamado habitualmente anteojo ocular divergente o anteojo de Galileo. (*N. de la t.*) <<

[*] «Discurso y demostración matemática en torno a dos nuevas ciencias relacionadas con la mecánica» (1638). (*N. de la t.*) <<

[*] *To the Danish Agent late was showne / That where no Ayre is, there's no breath / A glasse this secret did make knowne / Wherein a Catt was put to death / Out of the glasse the Ayre being screwed, / Puss dyed and ne'er so much as mewed // The self same glasse did*

likewise clear / Another secret more profound: / That nought butAyre unto the Eare / Can be the Medium of Sound / For in the glasse emptied of Ayre / A striking watch you cannot hear. <<

[*] Creada con una dotación de la familia Savile, de la cual George Savile (1633-1695) fue el primer marqués de Halifax. (*N. de la t.*) <<

[*] Cátedra creada con una dotación de Henry Lucas. <<

[*] Navío con una estrecha popa saliente, a diferencia de la popa cuadrada que seguía usándose en los países de navegación mediterránea. (*N. de la t.*) <<

[*] En el Trinity College, Ray era un *sizar* o *subsizar*, es decir, un «becario pobre» o sub-becario que pagaba tasas más bajas y trabajaba a cambio como sirviente de otros estudiantes, mientras que en Catherine Hall constaba como *scholar*, o sea como beneficiario de una *scholarship*, que era lo que entenderíamos actualmente por una «beca normal»: un dinero concedido a un estudiante por sus méritos académicos para que se pague los estudios y la manutención mientras realiza sus estudios. (*N. de la t.*) <<

[*] Significa «convención» o «pacto». En Escocia esta palabra designaba una asociación con vistas a una acción común y, en general, fueron asociaciones relacionadas con la Iglesia presbiteriana escocesa. (*N. de la t.*) <<

[*] También tipo o tronco. (*N. de la t.*) <<

[*] *Pan troglodytes* es el chimpancé, y es también la única especie existente en su género. (*N. de la T.*) <<

[*] Viaje que hacían por Europa los jóvenes caballeros para completar su educación. (*N. de la t.*) <<

[*] La palabra *calx* y su plural *calces* se emplean actualmente con el significado «residuos o escorias de la calcinación» o «cenizas metálicas». En los tiempos de Priestley, sin embargo, pa-

rece ser que esta palabra se refería a los óxidos metálicos en general. (*N. de la t.*) <<

[*] En el original, en inglés, *Buggins'turn*: sistema por el que se nombra o asciende a la persona siguiente por orden de antigüedad en el servicio, o por edad, y no por los méritos de los posibles candidatos. (*N. de la t.*) <<

[*] Más de 33 metros. (*N. de la t.*) <<

[*] Una definición moderna de este término que los científicos siempre utilizan en inglés sería: «Un *rift* es morfológicamente un surco continental alargado y estrecho que está limitado por fallas normales de distensión. Marca una zona a lo largo de la cual la litosfera se ha fracturado bajo condiciones tectónicas de extensión y relajación». [R. L. Batees y J. A. Jackson, eds., *Glosary of Geology* (3.ª edición), American Geological Institute, Alexandria, Virginia 1987, p. 569.] (*N. de la t.*) <<

[*] Llamada «dorsal Centroatlántica» (*N. de la t.*) <<

[*] Cresta o pequeña dorsal. (*N. de la t.*) <<

[*] Llamada actualmente cuanto de acción de Planck (*N. de la t.*) <<

[*] En la desintegración beta los núcleos emiten rayos beta. (*N. de la t.*) <<

[*] En el original, en inglés, QED (Quantum Electrodynamics). (*N. de la t.*) <<

[*] También «teoría cosmológica del estado estacionario». (*N. de la t.*) <<

[*] Actualmente llamado también «fondo continuo de radiación de microondas». (*N. de la t.*) <<

Notas al Capítulo 1

[1] Citado por Vivian Nutton, en Conrad y otros. Véase la bibliografía. <<

[2] A propósito, cabe mencionar otro conducto existente en el cuerpo humano, la trompa de Eustaquio, que une el oído medio con la faringe, y que fue descrito por Bartolomeo Eustachio, también en aquella época. No se trata de una coincidencia, sino más bien de un hecho que indica cómo una nueva generación de disectores abordaba su trabajo con entusiasmo. <<

Notas al Capítulo 2

[1] Citado por Dreyer a partir de la biografía de Tycho Brahe escrita por Gassendi, publicada por primera vez en 1654 y basada en los documentos personales de Tycho Brahe. <<

[2] Algunos astrónomos actuales opinan que el fenómeno conocido como la «estrella de Belén» pudo consistir en una serie de conjunciones similares que se produjeron en la época del nacimiento de Jesús. <<

[3] En la década de 1560, antes de la invención de relojes precisos, fijar la hora con exactitud era, desde luego, otro gran problema. He aquí otro de los muchos ejemplos de interdependencia entre ciencia y tecnología. <<

[4] En la actualidad sabemos que existen dos tipos de «estrellas nuevas»: unas brillantes y relativamente frecuentes, y otras mucho más brillantes todavía y mucho más raras. Las novas que son extraordinariamente brillantes se llaman, como es lógico, supernovas. La estrella nueva que apareció en 1572 fue en realidad un objeto extraordinariamente brillante y está considerada hoy en día como una supernova. Pero lo que resultaba más importante en la época de Tycho Brahe no era su brillo, sino el hecho de que surgiera una nueva estrella. <<

[5] Se produce una conjunción cuando un objeto astronómico se desplaza hasta situarse delante (o detrás) de otro; un eclipse de Sol es una conjunción en la que la Luna pasa por delante del Sol. <<

[6] La obra fue «publicada» en la medida en que al menos una gran parte del libro se imprimió en Hveen. Sin embargo, sólo

circularon unas pocas copias que llegaron a las manos de personas con las que Tycho Brahe estaba en contacto en aquella época. La publicación real de la obra completa no se llevó a cabo hasta 1603, siendo Johannes Kepler quien se encargó de la edición. <<

[7] Citado por Dreyer. Otras citas incluidas en este capítulo proceden de la misma fuente, salvo que se indique otra cosa. <<

[8] Citado por Shapin. <<

[9] Además de los sentimientos naturales de afecto hacia su madre, estaba el hecho de que, si ella hubiera sido declarada culpable de brujería, Kepler probablemente no habría podido continuar en el cargo para el cual le había nombrado el emperador. <<

Notas al Capítulo 3

[1] Algunas fuentes hablan de 1540, pero esta fecha parece ser un error. <<

[2] Esta cantidad equivale a varios millones de libras en el valor actual de la moneda y es difícil adivinar en qué pudo haber invertido tanto dinero, por lo que es probable que estas cifras sean una exageración. <<

[3] Esta y otras citas proceden de la traducción de P. Fleury Mottelay. <<

[4] Originalmente los peripatéticos fueron los seguidores (en el sentido más literal) de Aristóteles, pero también se aplicó este nombre a los filósofos italianos de finales del siglo. <<

[5] El título de este borrador era *Sobre el movimiento,* pero guardaba poco parecido con el libro que Galileo publicó con el mismo título algunos años más tarde. <<

[6] En 1605, Bellarmine podría haber sido elegido Papa casi con toda seguridad, pero él mismo se negó a presentarse como candidato, porque prefería ser el poder que actúa desde detrás del trono. <<

[7] *No lower than the other stars it lies / And does not move in other ways around / Titan all fixed stars—nor change in sign or size. / All this is proved on purest reason's ground; / It has no parallax for us on Earth / By reason of the sky's enormous girth.* Traducción al inglés tomada de Reston. <<

[8] También puede ser que Galileo estuviera intentando cubrirse las espaldas dejando abiertas todas las posibilidades, dado que sus explicaciones sobre la nueva estrella habían suscita-

do una cierta oposición en Padua, y, sin embargo, también pidió a los Mediéis que apoyaran la próxima renovación de su cargo allí. <<

[9] La importancia de Cristina se puede valorar por el hecho de que conservó su título de Gran Duquesa incluso después de que Cosme II se casara (la esposa de Cosme se convirtió meramente en archiduquesa) y, cuando éste falleció en 1621, actuó como regente, junto con su viuda, durante la minoría de edad del hijo de Cosme, que luego sería Fernando II. <<

[10] La razón por la cual el hielo es más ligero que el agua es una historia fascinante de la que hablaremos posteriormente. <<

[11] Muy poderosa, pero en definitiva no muy querida. Generaciones posteriores de romanos dirían sarcásticamente que lo que los bárbaros no habían arrasado, los Barberini lo habían robado. <<

[12] Citado por Reston. <<

[13] No del todo aislado; en sus últimos años de vida, Galileo recibía visitantes, como Thomas Hobbes y John Milton. <<

Notas al Capítulo 4

[1] Para completar la cuestión de los signos aritméticos, diremos que el símbolo (×) se introdujo en 1631, y el símbolo de la división no se implantó hasta 1659. William Oughtred, que fue quien introdujo el símbolo (×), había inventado también la regla del cursor unos diez años antes. <<

[2] No es sólo una coincidencia, ya que en aquella época la mayoría de las casas reales de Europa estaban conectadas por una red de matrimonios de conveniencia política. Sin embargo, este matrimonio resultó especialmente importante: la hija de Federico, Sofia, se casó con el elector de Hanover y fue la madre de Jorge I de Inglaterra. <<

[3] El barómetro se había inventado recientemente y Descartes fue la primera persona que sugirió que lo que este aparato medía era el peso del aire, que ejercía presión sobre la superficie de la Tierra. <<

[4] En la década de 1650, el alemán Otto von Guericke inventó una bomba de aire (llamada frecuentemente bomba de vacío), que podía reducir drásticamente la presión del aire dentro de un recipiente sellado, haciendo que se apagara la llama de una vela y que no se oyese el tañido de una campana cuando el aire, por aspiración, había salido del recinto. <<

[5] Con su mordacidad característica, Isaac Newton señaló posteriormente el fallo obvio que estaba implícito en esta teoría. Si la causa de la visión es la presión de este fluido invisible sobre los ojos, sería posible ver en la oscuridad, con tal de que el individuo se moviera corriendo a una velocidad suficiente.

Sin embargo, si hubiera estado todavía vivo para poder responder, Descartes habría replicado a Newton diciéndole que el problema era que nadie era capaz de correr a la velocidad suficiente para poder ver en la oscuridad. <<

[6] El propio Huygens tenía un punto ciego crucial que le impedía dar este paso al igual que Descartes: no creía que las fuerzas pudieran llegar a atravesar el espacio vacío, sino que, según pensaba él, sólo podían transmitirse por contacto directo o, en todo caso, a través de un fluido intermedio. <<

[7] Esta distancia se había obtenido a partir de las mediciones del paralaje de Marte realizadas en 1671 por un equipo francés que utilizaba observaciones simultáneas llevadas a cabo por Jean Richer desde Cayenne, en la Guayana francesa, y por Cassini desde París. La pequeña diferencia en la posición de Marte en un fondo de estrellas, cuando se observaba dicha posición desde los dos extremos de esta línea de base, hizo posible averiguar la distancia de la Tierra a Marte, y esta distancia, combinada con las leyes de Kepler, dio los diámetros de las órbitas de todos los planetas. Desde luego, todo esto (al igual que los trabajos de Römer) confirmó de manera impactante la validez del sistema copernicano, si es que alguien, aparte de las autoridades de Roma, necesitaba todavía que le convencieran. <<

[8] La Paz de Nimega no fue el final de esta historia. Luis XIV revocó el Edicto de Nantes en 1685 y la guerra volvió a estallar en 1688: esta vez duró nueve años e Inglaterra se puso del lado de los holandeses (a Carlos II le había sucedido en 1685 su hermano, Jacobo II, que era católico, y, como consecuencia de esto, Guillermo de Orange se convirtió en Guillermo III de Inglaterra, gobernando conjuntamente con su esposa Mary, la hija de Jacobo II, después de que el padre de ésta se viera forzado a abdicar en 1689). <<

[9] Cita de Pilkington. <<

[10] Fue en Florencia donde Robert Boyle, a los 15 años de edad, conoció los placeres de un burdel (como espectador), de la mano de su tutor y como parte de su amplia educación. Esta experiencia, junto con otra ocasión en que fue objeto de «un ridículo cortejo por parte de dos frailes, cuya lascivia no hacía distinción de sexos», parece que fueron la causa de que rechazara el sexo durante toda su vida. El celibato de Boyle ha dado lugar a las típicas e inevitables preguntas sobre su orientación sexual, pero el hecho de que se refiriera a los dos frailes llamándoles «sodomitas con hábito» que estaban «en celo, libidinosos como las cabras», sugiere que ciertamente no tenía inclinaciones homosexuales. <<

[11] Se dice que una autoridad como Oliver Cromwell señaló que no se habría producido ninguna rebelión irlandesa «si hubiera habido un conde de Cork en cada provincia». <<

[12] En todo esto hay algo realmente paradójico, ya que Boyle se convirtió en un terrateniente que vivía lejos de sus propiedades, lo cual era uno de los símbolos odiosos de la opresión inglesa sobre Irlanda. Sin embargo, para lo que se estilaba en la época, era un liberal, que en una ocasión escribió a un amigo suyo quejándose del coste que había tenido el funeral de un miembro de la aristocracia, alegando que hubiera sido mejor repartir aquel dinero entre los pobres. <<

[13] Su experimento más famoso fue el que realizó cuando tenía 65 años, saliendo al exterior en el frío de un día helador, para rellenar con nieve un pollo con el fin de ver si esto hacía que se conservase. Lo que consiguió realmente fue contraer una neumonía, y la consecuencia del experimento fue que Bacon murió. <<

[14] Citado en Hunter, a partir de *Christiart Virtuoso* de Boyle. <<

[15] Si el destino del gato parece un poco cruel, recuérdese que hablamos de una época en que todavía se mataba a los seres humanos quemándolos vivos. Sin embargo, da la sensación de que el poeta podría haber considerado que la muerte del gato era más impresionante que el hecho de dejar mudo el carillón de un reloj. <<

[16] Incluso el segundo conde de Cork recibió un título inglés, el de conde de Burlington, para añadirlo a su colección; su residencia en Londres, Burlington House, es actualmente la sede de la Royal Academy y de varias sociedades científicas. <<

[17] Lower, citado en Conrad y otros. <<

[18] Cowper vivió entre 1666 y 1709. Fue cirujano y miembro de la Royal Society. <<

Notas al Capítulo 5

[1] Del prólogo escrito por Richard Waller para *The Posthumous Works of Robert Hooke*, publicadas en 1705. <<

[2] 21 de enero de 1665. El 15 de febrero de aquel año, Pepys, que era miembro de la Royal Society y disfrutaba asistiendo a sus reuniones (aunque él mismo hiciera pocas contribuciones a la ciencia), informaba sobre una reunión en el Gresham College a la que asistieron científicos «del más alto nivel. Destacando por encima de todos, el señor Boyle estaba hoy en la reunión, y por encima de él destacaba el señor Hooke, que, aunque sus promesas son mínimas, tiene el máximo nivel que he visto nunca entre los hombres de todo el mundo». Esto da una noción exacta de la posición intelectual de Hooke en aquella época, así como una idea de su apariencia poco atractiva. <<

[3] Citado por Espinasse. <<

[4] Es significativo que, precisamente por lo consciente que era de la importancia de reconocer el mérito a quien se hiciera acreedor de tal reconocimiento, Hooke fue siempre cuidadoso (incluso generoso) en cuanto a valorar la obra de sus colegas en sus propias publicaciones, como lo hizo en el caso de Boyle. Esperaba que a él mismo se le otorgara también el reconocimiento de que se hubiera hecho acreedor, pero no hay pruebas de que reclamara alguna vez más de lo que merecía. <<

[5] *Founders of British Science*, pág. 248. <<

[6] Fue un acontecimiento notable, porque durante la segunda mitad del siglo XVII se observaron muy pocas manchas en el Sol. Esta época coincidió con un período de frío que sufrió Eu-

ropa, conocido como la «pequeña era glacial». Fue un frío tan intenso que, durante varios inviernos, especialmente el de 1683-1684 (como describió gráficamente John Evelyn), el río Támesis se heló con una capa de hielo tan resistente que fue posible instalar sobre su superficie unas auténticas ciudades de toldos conocidas como *Frost Fairs* («ferias del hielo»). Es casi seguro que existió una relación entre la calma que se produjo en la superficie del Sol y el enfriamiento de la Tierra. <<

[7] Extraído de un manuscrito que se encuentra en la Joseph Halle Schaffner Collection, en la biblioteca de la Universidad de Chicago. <<

[8] Además, a largo plazo, se benefició en cuanto a seguridad económica, ya que heredó (a través de su madre) no sólo las propiedades de su padre sino también una parte de las nada desdeñables propiedades de Barnabas Smith, además de alguna parte de las propiedades que Hannah había heredado de sus padres. Isaac Newton nunca tuvo que preocuparse por el dinero una vez cumplidos los 21 años, ya que a esta edad entró en posesión de la propiedad que Barnabas Smith le había asignado en una cláusula de su contrato matrimonial con Hannah. <<

[9] Como obra de divulgación que se centra en este aspecto de la vida de Newton, véase *Isaac Newton: the last sorcerer*, de Michael White. <<

[10] Newton siguió la doctrina de Arrio, un heresiarca helenístico del siglo IV. El arrianismo sostenía que Dios es un ser único y, por consiguiente, Jesús no era realmente divino. Estas ideas eran heréticas para una Iglesia que se basaba en el concepto de la Santísima Trinidad. <<

[11] De hecho, la cuestión matemática más difícil que se plantea en todo esto es la demostración de que, en realidad, es correcto medir las distancias al centro de la Tierra o del Sol, necesarias para la ley de los cuadrados inversos, considerando

que la gravedad actúa como si toda la masa estuviera concentrada en un solo punto. El cálculo infinitesimal hace que todo esto sea relativamente sencillo, pero Newton evitó deliberadamente aplicarlo en las demostraciones que publicó, porque era consciente de que sus colegas no aceptarían los cálculos salvo que estuvieran expresados en un lenguaje familiar. Nadie sabe si hizo todo primero usando el cálculo infinitesimal y luego lo tradujo a las matemáticas antiguas, pero, en caso de que lo hiciera así, esto resultaría aún más impresionante que si hubiera comenzado la tarea aplicando el modo de calcular que ya estaba pasado de moda. <<

[12] En realidad, Guillermo y Mary accedieron al trono como resultado de una invasión a gran escala de Gran Bretaña, en la que se tomó Londres por la fuerza, aunque se hizo prácticamente sin derramamiento de sangre y fue bien acogida por muchos británicos. Pero la historia la escriben los vencedores, y Revolución Gloriosa suena mucho mejor que invasión, si se desea tener contento al pueblo. La característica más significativa de esta «revolución», y que casi justifica su nombre, fue que inclinó la balanza del poder político en Gran Bretaña, reduciendo el poder del rey y favoreciendo al Parlamento, sin el cual Guillermo y Mary nunca habrían logrado acceder al trono. <<

[13] J. Conrad von Uffenbach en *London in 1710*. <<

[14] Gran Bretaña había recurrido a Jorge de Hanover para que fuera su rey, porque ya no quedaban más herederos de la familia Estuardo; aunque la reina Ana tuvo diecisiete hijos, sólo uno sobrevivió hasta hacerse adulto, pero murió en 1700. Jorge de Hanover era biznieto de Jacobo I, apenas hablaba una palabra de inglés y vivió en Hanover durante la mayor parte de su reinado (1714-1727). De todas formas, no importaba mucho quién fuera el rey, ya que era el Parlamento el que gobernaba el país. <<

Notas al Capítulo 6

[1] Ciertamente, Halley tenía experiencia previa en el mar (al menos en barcos) y, entre otras cosas, había participado en la supervisión de los accesos al Támesis a finales de la década de 1680, por lo que no era totalmente inexperto en temas de navegación. Sin embargo, los archivos están decepcionantemente vacíos de datos relativos a este aspecto de su vida anterior. <<

[2] No tiene relación alguna con el fabricante de relojes. <<

[3] Se puede ver aquí un precedente de la decisión de los investigadores privados en el sentido de mantener «en propiedad» los derechos de patente de los genes humanos, algo tan absurdo como afirmar que se puede poseer la patente de un árbol o del Sol. <<

[4] Para hacemos una idea de la manera en que Flamsteed había estado haciéndose el remolón, basta pensar que el observatorio había sido fundado por Carlos II, al que luego había sucedido Jacobo II, al que siguieron los reyes Guillermo y Mary, siendo por fin la reina Ana quien resolvió el embrollo del cuaderno de trabajo. <<

[5] Por supuesto, un candidato más apropiado para el papel de equivalente de Newton en la biología sería Charles Darwin. El hecho de que la obra más importante de Darwin se publicara casi 150 años después de la muerte de Newton refleja acertadamente la distancia a la que se encontraban las ciencias biológicas por detrás de la física a finales del siglo XVII, en parte por razones psicológicas, ya que las personas eran reacias a acep-

tarse a sí mismas como temas adecuados para ser objeto de la investigación científica. <<

[6] El nombre de este vicario era Samuel Collins, pero no se trata del famoso Samuel Collins que fue en un tiempo preboste del King's College de Cambridge. <<

[7] En medio de aquella confusión horriblemente complicada que la guerra civil desencadenó, los escoceses cambiaron de bando porque tanto Carlos I como Carlos II aceptaron posteriormente el Covenant, aunque esto tuvo escasas repercusiones en la historia de la ciencia. <<

[8] Sus libros se mencionan habitualmente dando el título en inglés, aunque escribió la mayoría de ellos originalmente en latín. <<

[9] Los resultados de ésta y de otras expediciones similares por el país, en las que participó acompañado por otros colegas, se publicaron finalmente como *English Catalogue* en 1670. <<

[10] Antes de los trabajos de Ray, las plantas y los animales se «clasificaban» en orden alfabético según sus nombres, y en esta lista se incluía a los animales míticos, como por ejemplo el unicornio. Hablando en sentido estricto, no es que esto contribuyera al caos, pero difícilmente se puede considerar como algo científico. <<

[11] Para darnos cuenta de la confusión que existía todavía en la década de 1660 con respecto a la naturaleza y el origen de la vida, observemos que hubo que esperar hasta 1668 para que Francesco Redi (1626-1698), mediante minuciosos experimentos con trozos de carne conservada en sal y protegida de moscas que pudieran poner allí sus huevos, demostrara que los gusanos no surgen espontáneamente de la carne putrefacta. <<

[12] Citado por Rayen a partir de las *Observations* de Ray. <<

[13] Para calibrar hasta qué punto Linneo tenía una elevada opinión de sí mismo, basta decir que escribió al menos cuatro

memorias autobiográficas, que se publicaron después de su muerte y transmiten su imagen a la inmediata posteridad. El brillo que dio a algunos de sus logros ha de tomarse con reservas, pero la categoría de su trabajo científico está clara, sin que sea necesario darle tanto lustre. <<

[14] Citado por Sten Lindroth, en Frängsmy. <<

[15] Una de las más importantes entre dichas colecciones está formada en torno a los materiales recogidos por el propio Linneo. Después de su muerte, estos materiales fueron comprados por un rico botánico inglés, James Smith, que contribuyó a fundar en 1788 la Linnean Society, con su sede en Londres. A la muerte de Smith, acaecida en 1828, esta sociedad compró la colección, que todavía está en su poder, por la considerable suma de 3150 libras esterlinas, asumiendo una deuda que tardó treinta y tres años en pagar. <<

[16] Citado por Gunnar Broberg en Frängsmyr. <<

[17] Sin embargo, más de una vez, Lenneo escribe: «hay tantas variedades como plantas producidas por la semilla de una misma especie», dando a entender que no existen dos individuos iguales acercándose a una de las ideas fundamentales que Darwin utilizaría más tarde pata desvelar los secretos de la evolución. Citado por Gunnar Eriksson en Frängsmyr. <<

[18] Sabemos actualmente que lo que allí sucede en realidad es que la tierra está ascendiendo. Durante la última era glacial, el peso del hielo hizo que la corteza sólida de aquella región se hundiera en los estratos de fluido que se encuentran bajo la superficie de la Tierra, y aún está subiendo como un efecto de rebote debido al hecho de haberse librado de aquel peso hace aproximadamente diez mil años. <<

[19] En realidad, no es así; las plantas están formada principalmente por dióxido de carbono procedente del aire. <<

[20] Citado por Frängsmyr. <<

[21] *Ibid.* <<

[22] Uno de estos visitantes, Thomas Jefferson, recordaba que «la costumbre de Buffon era permanecer en su estudio hasta la hora de comer y no recibir visitas bajo ningún pretexto; pero su casa y sus jardines estaban abiertos, al tiempo que un sirviente recibía muy cortésmente e invitaba a todos los amigos y extraños a que se quedaran a comer… comíamos con él y entonces, como siempre, demostraba ser un hombre dotado de una habilidad extraordinaria para la conversación». (Citado por Fellows y Milliken). <<

[23] Su habilidad como divulgador quedó ampliamente confirmada en 1747, cuando demostró en público que concentrando los rayos del Sol mediante una serie de espejos era posible prender fuego a la madera a una distancia de 200 pies [aproximadamente 60 metros], tal como Arquímedes decía haber hecho cuando los griegos derrotaron a la flota romana en Siracusa. <<

[24] Citado por Fellows y Milliken. <<

[25] Buffon evitó el conflicto con las autoridades eclesiásticas utilizando la tradicional fórmula de presentar sus teorías como meras «especulaciones filosóficas». Al fin y al cabo, si había sido un buen recurso para Galileo, ¿por qué no utilizarlo? Al menos por lo que respecta a las apariencias externas, Buffon siguió siendo un católico practicante hasta el final de su vida y recibió los últimos sacramentos. <<

[26] La razón principal por la que el núcleo está en la actualidad todavía tan caliente es la energía liberada en procesos radioactivos; más adelante ampliaremos esta explicación. <<

[27] Esto sugiere una irresistible imagen del cirujano que se inclina sobre su paciente blandiendo un escalpelo y diciéndole: «En realidad, yo quería ser poeta, ¿sabe?», antes de iniciar la faena. <<

[28] Los jacobinos fueron desalojados del poder y reemplazados por el Directorio en 1795, durando esta nueva forma de gobierno hasta 1799, año en que fue derribado por el golpe que llevó a Napoleón al poder; y mientras tanto Montbéliard había sido tragado por la Francia revolucionaria en 1793. <<

[29] Véase Outram. <<

[30] Quizá resulte interesante situar todo esto en su contexto histórico indicando que Cuvier realizó su gran obra casi doscientos años después de la gran obra de Galileo; el intervalo de tiempo transcurrido entre Galileo y Cuvier es casi el mismo que ha transcurrido desde Cuvier hasta nuestros días. <<

[31] Citado por David Young en *The Discovery of Evolution*. <<

Notas al Capítulo 7

[1] Anders Celsius (1701-1744) no presentó la escala de temperaturas que lleva su nombre hasta 1742. <<

[2] Uno de los discípulos de Black, Benjamín Rush (1746-1813), se convirtió en el primer catedrático de química de Estados Unidos, en el *Philadelphia College,* en 1769. <<

[3] Entre sus amigos, además de Black, se encontraba James Hutton, con el que participó en expediciones geológicas. <<

[4] Dado que es la presión atmosférica la que impulsa el émbolo hacia abajo, a la máquina de vapor de Newcomen se le denomina a veces máquina atmosférica. Fue Watt quien introdujo el vapor como fluido impulsor en sus diseños, y es por esto por lo que a menudo se presenta a Watt como el inventor de la máquina de vapor, a pesar de la máquina de Newcomen también utilizaba vapor. <<

[5] En sentido estricto, de la misma manera que el vapor de agua se condensa. Este vapor al que nos referimos es una mezcla de vapor de agua y pequeñas gotas de agua muy caliente. <<

[6] La clásica industria familiar que pronto sería reemplazada por fábricas que utilizaban la fuerza del vapor. <<

[7] Thomas Jefferson se apropió de algunas de las bellas frases que aparecen en los escritos de Priestley sobre la libertad y las incorporó a la Declaración de Independencia americana. <<

[8] Gracias a este trabajo, Priestley fue considerado como posible candidato a una plaza de naturalista para el segundo viaje de James Cook alrededor del mundo, pero fue rechazado por motivos religiosos. Este hecho le indujo a hacer el siguiente co-

mentario: «Creía que esto era una cuestión de "filosofía" y no de "divinidad"». <<

[9] Walpole encabezó un gobierno *whig*, estrechamente identificado en aquella época con el triunfo de la Revolución Gloriosa; los *lories* de la oposición fueron todavía, hasta la década de 1740, en gran medida jacobitas y es lógico pensar que un cambio de gobierno durante aquellos dieciséis años hubiera podido llevar a la restauración de la dinastía de los Estuardo; esta posibilidad no empezó a desvanecerse realmente hasta la derrota del príncipe Carlos (Bonnie Prince Charles) en Culloden, que puso fin a su rebelión de 1745. <<

[10] *Cavendish: the experimental life*. <<

[11] Frederick había venido al mundo dos años después de nacer Henry, y moriría también dos años después de morir Henry, en 1812. Charles, Henry y Frederick Cavendish vivieron todos ellos hasta los 79 años de edad. <<

[12] No hay en absoluto pruebas que justifiquen el mito de que, en aquellas ocasiones, Charles Cavendish enviara a Henry a la cena dándole sólo los pocos chelines que necesitaba para pagarla y ni un penique más. <<

[13] Libro de actas del Royal Society Club, citado por Jungnickel y McCormmach. <<

[14] *Philosophical Transactions*, volumen 74, p. 119, 1784. <<

[15] La famosa fórmula de Einstein $e = mc^2$ nos dice que la energía emitida se corresponde con una pérdida de peso, pero ésta es demasiado pequeña para que pudiera medirse en aquellos experimentos. <<

[16] Cuando utiliza la palabra casi quiere decir «casi exactamente». <<

[17] Fue Blagden quien, por sugerencia de Cavendish, realizó mediciones de la temperatura del mar durante un viaje a Amé-

rica a mediados de la década de 1770 y descubrió la temperatura cálida que tenía la corriente del Golfo. <<

[18] Volumen 88, p. 526, 1798. <<

[19] Citado por Jungnickel y McCormmach. <<

[20] *The Earth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1913. <<

[21] Las personas como Lavoisier no «recaudaban» realmente los impuestos, sino que estaban en la cima de la pirámide. Los *fermiers* empleaban a administradores y tipos duros para que realizaran el trabajo real. <<

[22] La palabra *oxígeno* viene del griego y significa «generador de ácido». Lavoisier pensó equivocadamente que el oxígeno estaba presente en todos los ácidos. <<

[23] Sin embargo, Lavoisier cometió un desliz al introducir el «calórico», el «elemento del calor», en su tabla, junto con otros como el oxígeno, el hidrógeno, el carbono, el azufre, el oro y el plomo. <<

Notas al Capítulo 8

[1] Véase, por ejemplo, el capítulo 9. <<

[2] Este método de «fabricación» de electricidad estática mediante la fricción es la razón por la cual se puede hacer que el globo de un niño, tras ser frotado con un jersey de lana, se pegue al techo, y la causa de que nuestros cabellos se queden electrificados cuando los cepillamos. <<

[3] Dicho sea de paso, Euler se quedó ciego por mirar al Sol, justo lo que todos los libros de divulgación de astronomía nos advierten que no hagamos. ¡Esta advertencia está basada en hechos! <<

[4] Michell, que tenía mucho de sabio polifacético, comenzó a adquirir renombre con su investigación sobre el gran terremoto que sacudió Lisboa en 1755, demostrando que la perturbación se había originado debajo de la corteza terrestre, bajo las profundidades del océano Atlántico, y afirmó que los seísmos no tenían nada que ver con las perturbaciones atmosféricas, como se había pensado hasta entonces. Probablemente hubiera podido realizar más trabajos científicos, pero en 1764 renunció a su plaza de catedrático de geología en Cambridge y se convirtió en pastor de una parroquia de Thornhill, en Yorkshire. <<

[5] En ésta, como en otras muchas ocasiones, Laplace tuvo el incentivo de poder discutir el problema con Joseph Lagrange (1736-1813), un matemático cuyos trabajos sobre teoría de grupos y la invención de una función matemática (la lagrangiana), que caracteriza el camino o trayectoria que sigue una par-

tícula, demostraron tener un valor inmenso para los físicos del siglo XX. <<

[6] Traducción inglesa de Gillispie. <<

[7] Debido a que la Tierra es más densa que el Sol, Laplace dio una cifra de 250 veces el diámetro de éste, mientras que Michell dio el doble de este número. <<

[8] En realidad este término fue acuñado en 1834 por William Prout (1785-1850). <<

[9] El Sacro Imperio Romano llegó definitivamente a su fin en agosto de 1806, como un efecto secundario de las guerras napoleónicas, cuando el último emperador, Francisco II (que había accedido al trono de emperador en julio de 1792) abdicó y pasó a ser solamente Francisco I de Austria. Rumford se convirtió en conde de un Imperio que ya no existía. <<

[10] Por supuesto, Austria era entonces la potencia más importante de Centroeuropa. <<

[11] También conoció a Joseph Guillotin, el inventor de la guillotina, pero presumiblemente no en las misma reuniones sociales en que coincidía con madame Lavoisier. Rumford describió al señor Guillotin como «una persona muy humana, bondadosa y educada»; recuérdese que este señor inventó la guillotina como una alternativa más compasiva que la horca para los condenados. <<

[12] La explicación moderna consiste en decir que, cuando se dispara la bala, una parte de la energía de la explosión se invierte en hacer que la bala se mueva, por lo que queda menos energía disponible para difundirse en forma de calor por el tubo del cañón. <<

[13] Cita de Brown. <<

[14] Ambos términos siguen siendo utilizados de forma equivocada por aquellos que intentan desacreditar las teorías de sus rivales; el punto de confusión más importante es que, dado que

la historia de la Tierra es tan larga, los acontecimientos que parecen raros y dramáticos en una escala de tiempo humana (como el choque de grandes meteoros contra la Tierra), y que ciertamente son catastróficos según el significado habitual de este término, son normales y además, según la terminología geológica, son al mismo tiempo «uniformitarianistas» por lo que respecta a la historia del planeta. Todo depende de la perspectiva. Para una mariposa que vive sólo un día, la caída de la noche es una catástrofe, mientras que para nosotros no pasa de ser rutina. Para nosotros, una nueva era glacial sería una catástrofe, pero para el planeta Tierra sería mera rutina. <<

Notas al Capítulo 9

[1] La Corona adquiría (o se vendían en el mercado libre) los barcos y el botín capturados al enemigo, repartiéndose los beneficios entre los hombres que habían participado en la acción. El reparto de realizaba según unas reglas estrictas establecidas, correspondiéndole la mayor parte, por supuesto, al almirante, y una parte mínima a cada marinero; ésta era la razón principal a la hora de convencer a los hombres para que entraran en la armada real, a pesar de las condiciones extremadamente duras y lo reducido de la paga. La mayoría de los hombres nunca recibía una recompensa en metálico que fuera significativa, si es que recibía algo alguna vez, pero les animaba el ejemplo de los pocos que habían llegado a conseguir una recompensa sustanciosa. <<

[2] Dejando sus propiedades de Escocia en manos de sus apoderados. <<

[3] Exactamente el tipo de párroco rural que aparece en las páginas de las novelas de Jane Austen, que falleció en 1817, el año en que Lyell comenzó a interesarse por la geología. <<

[4] Citas tomadas de *Principles of Geology*. La cursiva es de Lyell. <<

[5] El subtítulo que aparece en la portada del volumen dice «Un intento de explicar los cambios que se han producido con anterioridad en la superficie de la Tierra, utilizando como referencia las causas que están ahora actuando». No cabía la posibilidad de que los futuros compradores abrigaran duda alguna con respecto a las intenciones de Lyell. <<

[6] Aunque lo cierto es que estaba evolucionando así; la analogía más aproximada es la que se puede hacer con la cosmología en el siglo XX, tanto con respecto a la actividad científica, como al interés popular que suscitaba el tema. <<

[7] Para las pruebas en que se basan estas llamativas afirmaciones, véase la biografía de Erasmus Darwin escrita por Desmond King-Hele. Coleridge visitó a Erasmus en 1796. <<

[8] Al decir «era» [en el original *age*], Erasmus Darwin se refiere probablemente a un período de unos cien años, por lo que se puede afirmar que se adelantaba a su época con sus ideas sobre la escala temporal de la evolución. <<

[9] Recordemos que en aquella época la Iglesia todavía enseñaba que las especies fueron creadas de una en una por Dios y que, una vez creadas, permanecían fijas e inmutables. <<

[10] A partir de la traducción citada por Jordanova. <<

[11] Citado en *From the Greeks to Darwin*, de Henry Osborn. <<

[12] Posiblemente estos largos paseos fueron la causa de que se desarrollara su interés por la historia natural, y no el resultado de un interés previo; esto encajaría con la idea de que Darwin quedó en realidad profundamente afectado por los acontecimientos de 1817 y 1818. <<

[13] La edición de Nora Barlow es la mejor fuente par a conocer estos aspectos de la juventud de Darwin. <<

[14] Citado por Browne. <<

[15] Carta citada en *Darwin*, de Jonathan Howard. <<

[16] Su nombre completo era *Journal of Researches into the Geology and Natural History of the Various Countries Visited by HMS Beagle, under the Command of Captain Fitzroy, R. N., from 1832 to 1836 (Diario de investigación sobre la geología y la historia natural de los distintos países visitados por el Beagle, bajo el mando del capitán FitzRoy de la Armada Real, desde 1832 a 1836).* <<

[17] Se puede encontrar todavía un ejemplar de este ensayo en una edición realizada por Antony Flew. <<

[18] El fallo que contiene este argumento se podría resumir en una palabra que era casi tabú en la época victoriana: contracepción. <<

[19] Howard Gruber, *Darwin on Man*. <<

[20] *My Life*. <<

[21] La partida se vio retrasada por el comienzo de la guerra de Crimea. <<

[22] *My Life*. Esto fue escrito mucho después de producirse el acontecimiento mencionado, lo que explica que Wallace utilizara la expresión supervivencia de los más aptos, que no aparece en las formulaciones originales de la teoría realizadas por Darwin o por el propio Wallace. <<

[23] Véase *Autobiography*, editada por Francis Darwin. <<

[24] En su autobiografía, Darwin comentó lo siguiente: «nuestras publicaciones conjuntas llamaron poco la atención, y la única observación que recuerdo fue la publicada por el profesor Haughton de Dublín, cuyo veredicto consistió en afirmar que en todo aquello, lo que resultaba nuevo era falso, y lo que era verdadero era ya viejo». <<

[25] Citado por Wilma George. <<

[26] Huxley (1825-1895) merece un espacio mucho más amplio que el que podemos darle aquí, aunque no tanto por su propia obra científica, que fue importante pero no abrió nuevos caminos, ni por su papel como «bulldog de Darwin» en la promoción de la teoría de la selección natural. Su importancia real dentro de la historia de la ciencia está en que, a fuerza de gran habilidad y trabajo duro, escaló desde sus orígenes humildes hasta convertirse en una destacada figura científica; además, luchó por conseguir una mejor educación para las clases trabajadoras y contribuyó a fundar nuevos centros de aprendi-

zaje donde la entrada no estaba reservada exclusivamente a los caballeros de la burguesía o de la nobleza y que se crearon en Londres, Birmingham y Manchester, así como la Universidad Johns Hopkins en Baltimore. Contribuyó a que la ciencia fuese una profesión retribuida en vez de un pasatiempo de aficionados reservado para los ricos. Es una de esas pequeñas ironías de la vida que en 1858 defendiera de manera efectiva la causa del caballero aficionado que era Darwin (representante de todo aquello que Huxley detestaba, salvo en su faceta de científico brillante), en vez de apoyar a un miembro de la clase trabajadora, como era Wallace. Aunque lamentamos relegar a Huxley a una nota a pie de página, nos consuela pensar que el lector puede encontrar todo lo relativo a él en la excelente biografía escrita por Adrian Desmond. <<

Notas al Capítulo 10

[1] Imágenes de Greenaway. <<

[2] Véase Hartley. <<

[3] En aquella época esto era realmente un modelo, pero por razones históricas nos atendremos al convenio de llamarla teoría. <<

[4] o puede formar «enlaces dobles» (e incluso triples) con un número menor de átomos, como sucede en el dióxido de carbono, CO_2, que podemos representar como O=C=O. <<

[5] En aquellos tiempos, Italia era todavía un rompecabezas de pequeños estados, de tal modo que el estatus que tenía Cannizzaro como revolucionario fracasado en Sicilia no le impedía automáticamente encontrar refugio en la parte continental de Italia. <<

[6] Es una circunstancia muy adecuada el hecho de que Newlands fuera una de las personas que se basaran en la obra de Cannizzaro. La madre de Newlands descendía de italianos y, al igual que Cannizzaro, Newlands luchó con Garibaldi en Sicilia en 1860. <<

[7] Mendeleiev pudo haber tenido conocimiento de los trabajos de Béguyer, aunque no de los de Newlands, pero esto no resta mérito a sus propios logros, que fueron mucho más allá del confuso informe sobre pautas que se repetían de manera periódica publicado por Béguyer en 1862. <<

[8] Exactamente diez años después de que Darwin publicara *El origen de las especies*; en el siglo XIX se estaban realizando tantos trabajos científicos de manera paralela, que a veces es difícil

averiguar quién estaba haciendo qué, y cuándo lo estaba haciendo. <<

[9] Marc Séguin (1786-1875) había publicado una versión menos precisa en 1839. <<

[10] Hemos de mencionar que John Herapath (1790-1868), nacido en Bristol, desarrolló una primera versión de la teoría cinética y la publicó en 1821; aunque iba muy por delante de su tiempo para poder ser precisa cuantitativamente, la obra de Herapath era algo que Joule ya conocía y contribuyó a situarle en la dirección correcta. <<

[11] Véase Cercignani. <<

[12] Existe la versión inglesa en una edición realiza da y traducida por P. A. Schilpp, y publicada por Open Court, La Salle, Illinois, 1979. <<

[13] Más tarde, Einstein solía complacerse en relatar a su audiencia que los examinadores sólo pusieron una objeción a su tesis: que era demasiado breve. Entonces él les planteó que podría añadir una frase más, lo hizo y la tesis fue aceptada. Tal vez sea conveniente admitir con reservas este relato. <<

[14] Poco faltó para que Loschmidt (1821-1895) llegara a ser aún más famoso de lo que es. De manera independiente desarrolló muchas teorías importantes sobre la estructura de las moléculas orgánicas, pero publicó este trabajo únicamente en un folleto que se difundió en círculos privados en 1861 y fue ignorado cuando Kekulé hizo públicas unas teorías similares a mediados de la década de 1860. <<

[15] Quizá valga la pena insistir en que el conocimiento del número de Avogadro y, por ejemplo, los volúmenes relativos de la misma masa de una sustancia en sus formas líquida y gaseosa nos dan automáticamente la medida del diámetro de las moléculas de dicha sustancia, por lo que cuando nos referimos a las mediciones del número de Avogadro hay que entender que es-

tamos describiendo mediciones de los tamaños de las moléculas. <<

[16] Traducido a partir de *Einstein's Miraculous Year*; John Stachel reedita en inglés, con comentario añadido, todos los trabajos clásicos de Einstein de 1905. <<

[17] El valor actual del número de Avogadro (llamado ahora también constante de Avogadro) es $6{,}022 \times 10^{23}$ <<

Notas al Capítulo 11

[1] Los bordes aparecen coloreados, como un arco iris, porque las distintas longitudes de onda de la luz se doblan o desvían en mayor o menor medida, y esas distintas longitudes de ondas corresponden a los distintos colores. <<

[2] Citado por Zajonc. <<

[3] Fragmento de la obra de Young titulada *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts,* citado por Baierlein. <<

[4] Véase Baierlein. La cita siguiente procede de la misma fuente. <<

[5] Aunque, de hecho, fue Michael Faraday quien inventó el diseño básico del mechero, y luego lo perfeccionó el ayudante de Bunsen, Peter Desdega, que tuvo el buen sentido de comercializarlo con el nombre de su jefe. <<

[6] Frío es un término relativo. Las rayas de Fraunhofer son oscuras porque, aunque cualquier gas de la atmósfera del Sol está caliente, no está tan caliente como la propia superficie del Sol, que es de donde viene la luz. <<

[7] La madre de Faraday vivió hasta 1838, lo suficiente para ver cómo su hijo se convertía en uno de los grandes científicos de su generación. <<

[8] Véase Hartley. <<

[9] Citado por Crowther en *British Scientists of the Nineteenth Century*. <<

[10] El americano Joseph Henry (1797-1878), que por aquel entonces daba clases en la Albany Academy de Nueva York, descubrió la inducción electromagnética un poco antes que Faraday, pero no había publicado sus descubrimientos, razón por la cual éstos eran desconocidos en Europa en 1831. <<

[11] Esta recuperación se ha de entender como algo relativo; después de aquella crisis, nunca volvió a ser el mismo. <<

[12] El gran informe de 1864 y la mayor parte del resto de las publicaciones científicas de Maxwell se pueden encontrar en *The Scientific Papers of J. Clerk Maxwell* (véase la bibliografía). <<

[13] Además, existe un tercer tipo de creencia, en algunas religiones, según la cual toda la cuestión se reduce a creer una historia religiosa, sin prueba alguna, sólo con la fe. <<

[14] *Op. cit*. <<

[15] Maxwell, *op. cit*. <<

[16] También editó *The Unpublished Electrical Writings of the Honorable Henry Cavendish*, que se publicó en 1879. <<

[17] En un mundo sensato, y con una medición que es actualmente tan precisa, deberíamos hacer un pequeñísimo ajuste en la longitud del metro, definiéndolo de tal forma que la velocidad de la luz fuera exactamente 300 000 km/s. <<

Notas al Capítulo 12

[1] La obra fue publicada por Friedrich Viewege, en Brunswick; sobre la traducción inglesa definitiva de la cuarta edición, véase Bibliografía. <<

[2] Hija del meteorólogo Wladimir Köppen (1846-1940), nacido en Rusia, que fue amigo y colega de Wegener. <<

[3] El cálculo preciso de la edad de la Tierra llevó tanto tiempo porque, aunque los principios en que se basaba la técnica eran conocidos desde 1910, la tecnología que se necesitaba para realizar las mediciones con la precisión requerida tardó varias décadas en desarrollarse. Como siempre, la ciencia necesita de la tecnología para avanzar, en la misma medida que la tecnología necesita de la ciencia. Citado por Lewis. <<

[4] Citado por Lewis. <<

[5] Cifras proporcionadas por Le Grand. <<

[6] La expresión *spreading sea-floor theory* (teoría de fondos marinos en expansión) apareció en un informe publicado en 1961, pero pronto se adaptó a la forma *sea-floor spreading* (expansión de fondos marinos), que resulta más ágil. <<

[7] Las características generales de la estructura interna de la Tierra se conocen actualmente bastante bien porque se ha comprobado lo que hay en el interior de nuestro planeta mediante el estudio de las ondas sísmicas producidas en los terremotos, así como de las originadas por la explosión de bombas atómicas en pruebas subterráneas realizadas durante la época de la Guerra Fría; lamentablemente, los detalles forman parte

de los numerosos aspectos de la ciencia moderna para cuya discusión no disponemos aquí de espacio suficiente. <<

[8] Literalmente significa «actividad constructora», y procede de la palabra griega τεκτονικός, que significa «arquitecto» o «constructor». <<

[9] Hay cierta evidencia de que las reconstrucciones geográficas de los antiguos supercontinentes encaja mejor si se acepta que la Tierra se ha expandido muy ligeramente desde la fragmentación de la Pangea. Esto resulta intrigante, pero incluso si la evidencia se sostiene, el efecto consiguiente es sólo un pequeño detalle y no un factor importante en la acción motriz de la deriva continental. <<

[10] Conversación con J. G., hacia 1967. <<

[11] Aún no se sabe exactamente por qué ocurre esto, pero se cree que puede ser resultado del efecto de dinamo que se produce en el núcleo fluido de la Tierra, un efecto que se agota y desaparece de forma progresiva, volviendo a aparecer en sentido contrario. Misteriosamente, el Sol, del que se cree que posee también una dinamo interna, experimenta una pauta similar de inversiones magnéticas, pero mucho más rápidamente y con una regularidad mucho mayor, que está asociada con el ciclo de las manchas solares, cuyo período es de aproximadamente once años. <<

[12] W. C. Pitman y J. P. Heirtzler, *Science*, vol. 154, 1966, pp. 1164-1171. <<

[13] Blackett, Bullard y Runcorn, *A Symposium on Continental Drift*. <<

[14] Volumen 216, pp. 1276-1280. <<

[15] Por supuesto, no se trataba de una revolución; esperamos haber dejado claro el modo en que evolucionaron estas teorías, construyéndose pacientemente nuevos modelos a partir de datos nuevos, es decir, del modo habitual en que avanza la ciencia.

La idea de que han existido revoluciones científicas es esencialmente un mito que les encanta a los sociólogos que nunca han trabajado en el duro tajo de la ciencia. <<

[16] Editado por Gass, Smith y Wilson. <<

[17] No era un montañero en el sentido deportivo actual, sino una persona que se ganaba la vida en las montañas, en este caso cazando gamuzas. <<

[18] Citado por Elizabeth Carey Agassiz. <<

[19] En una escala temporal de decenas de miles de años, la inclinación se ve afectada varias veces por unos bamboleos, sobre los cuales trataremos en breve. <<

[20] Los cálculos modernos ponen de manifiesto que la duración de este ciclo en realidad oscila entre 23 000 y 26 000 años, es decir, a escalas de tiempo aún más amplias, como resultado de las interacciones gravitatorias con otros cuerpos del sistema solar. <<

[21] Para un esbozo autobiográfico de Croll, véase Irons. El resto de las citas de Croll proceden de la misma fuente. <<

[22] Véase *Durch ferne Welten und Zeiten*; ésta es la fuente principal de información (aunque probablemente sesgada) sobre Milankovitch. <<

[23] Y también por la composición de la atmósfera, que es donde aparece el efecto invernadero; sin embargo, para estos cálculos suponemos que la atmósfera ha tenido la misma composición desde hace unos pocos millones de años. <<

[24] J. D. Hays, J. Imbrie y N. J. Shackleton, «Variations in the earth’s orbit: Pacemaker of the ice ages», *Science,* volumen 194, 1976, pp. 1112-1132. <<

[25] La datación del momento en que se separó la líne a humana de los demás monos africanos se ha obtenido mediante mediciones directas del ADN, que proporciona una especie de «reloj molecular». Esta datación quedó definitivamente esta-

blecida en la década de 1990, según explican John Gribbin y Jeremy Cherfas en *The First Chimpanzee,* Penguin, Londres, 2001. <<

[26] Quizá la única «revolución» científica que justifica realmente el uso de esta palabra. <<

Notas al Capítulo 13

[1] *Proceedings of the Royal Society*, volumen 19, 1871, p. 236. <<

[2] Esta conferencia está reproducida en Bragg y Porter. <<

[3] J. J. Thomson, *Recollections and Reflections*. <<

[4] J. J. Thomson, *Philosophical Magazine*, volumen 48, 1899, p. 547. El físico holandés Hendrik Lorentz, al que ya hemos mencionado por la famosa contracción de Lorentz-Fitzgerald, no tardó en dar a los «corpúsculos» de Thomson el nombre de electrón, tal como lo conocemos en la actualidad. <<

[5] Silvanus Thompson, en Inglaterra, hizo exactamente el mismo descubrimiento casi al mismo tiempo, pero Becquerel lo publicó primero. <<

[6] La identificación de los rayos alfa y beta tuvo lugar en Cambridge, aunque se dio a conocer en un informe publicado en 1899, después de que Rutherford se hubiera marchado a Canadá. <<

[7] La seguridad que le proporcionaba este trabajo permitió a Rutherford casarse con su prometida, May Newton, en 1900. May había estado esperando pacientemente en Nueva Zelanda desde 1895, viendo a Ernest sólo durante las vacaciones. <<

[8] Entretanto, Rutherford recibió el Premio Nobel, en 1908, pero fue el de química, no el de física. En aquellos momentos, los químicos consideraban que la radioactividad pertenecía a su dominio; sin embargo, el premio provocó una cierta hilaridad entre sus colegas, ya que era sabido que Rutherford consideraba la química como una rama inferior de la ciencia. <<

[9] Irène era hija de Pierre y Marie Curie; cuando se casó con su colega, el físico Frédéric Joliot en 1926, ambos adoptaron el apellido Joliot-Curie. <<

[10] El nombre ya se había propuesto anteriormente varias veces para otras partículas de las que se suponía que eran neutras, pero ésta fue la primera referencia a «nuestros» neutrones. <<

[11] Citado en una carta a su amigo Conrad Habicht. Véase *Einstein's Miraculous Year,* de John Stachel. <<

[12] Véase *Einstein's Miraculous Year,* de John Stachel. <<

[13] Véase *Reviews of Modern Physics,* volumen XXI, 1949, p. 343. <<

[14] En sentido estricto, un planeta que gira en órbita alrededor de una estrella, moviéndose por el campo gravitatorio de dicha estrella, generará una radiación gravitatoria y perderá energía lentamente de una manera similar; pero la gravedad es una fuerza tan débil que no produce efectos que se puedan medir en la órbita de un planeta como la Tierra, ni siquiera en miles de millones de años (después de todo, pensemos que es necesaria la gravedad de toda la Tierra para superar las fuerzas eléctricas que actúan entre unos pocos átomos del tallo de una manzana y hacer que ésta caiga del árbol). <<

[15] Al menos sucedió así en el caso del hidrógeno, que es el átomo más sencillo que existe; resultó mu y difícil realizar los cálculos en los casos de átomos complejos, pero lo conseguido fue suficiente para demostrar que el modelo funcionaba. <<

[16] Un electrón negativo debe tener carga positiva, porque todo electrón tiene carga negativa y dos negativos equivalen a un positivo. <<

[17] *Philosophical Magazine,* volumen 42, 1921, p. 923. <<

[18] Citado por Pais en *Inward Bound.* <<

[19] Es un ejemplo típico, y no algo que se haya elegido porque sea el único que haga que la teoría y la comprobación experi-

mental encajen correctamente. <<

[20] La teoría general de la relatividad se ha comprobado con una precisión similar a finales del siglo XX, midiendo los cambios en las propiedades de objetos astronómicos conocidos, como los púlsares binarios, a muchos años luz de distancia de la Tierra; sin embargo, aunque en este caso se trata de un logro impresionante, no es en absoluto lo mismo que realizar los experimentos en condiciones controladas dentro de un laboratorio situado sobre la superficie terrestre. <<

Notas al Capítulo 14

[1] Ahora no es el momento de entrar en detalles sobre la razón por la cual estos críticos estaban equivocados, pero si el lector desea saber cómo funciona la evolución cuando actúa, entre otras cosas, para convertir a un ciervo en una jirafa, lo mejor es que comience leyendo el libro de Richard Dawkins *The Blind Watchmaker*. <<

[2] Citado por David Young en *The Discovery of Evolution*. <<

[3] Todo esto se refiere, por supuesto, a la reproducción sexual. La reproducción asexual es, con gran diferencia, mucho más sencilla, siendo las células hijas unas réplicas exactas de las células madres (véase *The Mating Game*, de Gribbin y Cherfas); sin embargo, dado que nosotros somos una especie que se reproduce sexualmente, la modalidad que resulta fundamental para nuestra propia historia es la reproducción sexual. <<

[4] La traducción al inglés que aparece en el original es de Iltis. <<

[5] Tschermak era en aquella época un estudiante de 26 años que ya había obtenido la licenciatura. Ciertamente, descubrió por su cuenta los informes de Mendel, per o por sí mismo sólo hizo una contribución menor, comparada con las de De Vries y Correns. <<

[6] Mendel optó por los guisantes porque sabía que tenían unas características distintivas que se transmitían fielmente en los cultivos y a las que se podía aplicar el análisis estadístico. <<

[7] Los seres humanos tenemos 23 pares de cromosomas; pero no hay una relación simple entre la complejidad del fenotipo

y el número de cromosomas: algunos helechos tienen más de 300 pares de cromosomas en cada célula. <<

[8] Esta pauta es a la inversa en unas pocas especies, y hay otros casos extraños, pero no son importantes para lo que estamos tratando aquí. <<

[9] *Jenaische Zeitschrift für Medizin und Naturwissenschaft*, volumen 18, p. 276. <<

[10] *The Cell in Development and Inheritance*. Wilson fue catedrático de zoología en la Universidad de Columbia, y dirigía el departamento donde Morgan llevaría cabo sus experimentos con la mosca de la fruta. <<

[11] Después de todo, contradecía frontalmente la hipótesis tetranucleótida y esto era grave, dado que Lavene fue figura destacada e influyente en el Rockefeller Institute hasta su muerte en 1940. <<

[12] Véase Judson. <<

[13] Esto es así en circunstancias normales, pero siempre hay alguna excepción, aunque éste no es lugar para ponerse a dar tantas explicaciones. <<

[14] Lo que Von Laue hizo fue, más exactamente, diseñar el experimento, que en realidad fue llevado a cabo por Walther Friedrich y Paul Knipping en el Instituto de Física Teórica de Munich; esto recuerda cómo Ernest Rutherford diseñó el experimento que llevaron a cabo Hans Geiger y Ernest Marsden, y que puso de manifiesto la existencia del núcleo del átomo. <<

[15] Véase Judson. No era un alarde infundado, sino una mera constatación de los hechos; Pauling recibió merecidamente el Premio Nobel por este trabajo en 1954. En 1962, recibió el Premio Nobel de la paz por su trabajo en la campaña a favor del desarme nuclear. <<

[16] En este caso, era en realidad la entropía lo que Pauling estaba investigando, pero el principio es el mismo. <<

[17] Véase Judson. <<

[18] Véase *Chemistry*. <<

[19] Cualquier duda que pudiera quedar desapareció más o menos en aquella época gracias a un brillante experimento en el que los estadounidenses Alfred Hershey y Martha Chase, que trabajaban en el Cold Spring Harbor Laboratory, en Long Island, demostraron que el material genético de los virus está formado por ADN. <<

[20] Las hebras no se desenrollan totalmente antes de que empiece el proceso de hacer copias. Al contrario, cuando la hélice doble comienza a desenrollarse, empieza a formarse una nueva pareja para cada una de las hebras, y estas nuevas parejas se van enroscando alrededor de las previamente existentes a medida que el proceso continúa, de tal forma que para cuando el despliegue de la hélice inicial ha terminado, las dos hélices hijas están prácticamente terminadas. <<

Notas al Capítulo 15

[1] Para hacernos una idea de lo que significan estas magnitudes angulares, pensemos que la luna llena cubre 31 minutos de arco, es decir, más de medio grado; por lo tanto, un segundo de arco es aproximadamente una sexagésima parte de un trigésima parte, o lo que es igual 1/1800 de la anchura aparente de la Luna en el cielo. <<

[2] Por ejemplo, las distancias a grupos de estrellas que se mueven juntas a través del espacio, formando un *cluster* o cúmulo de estrellas, pueden determinarse geométricamente de manera aproximada, midiendo el modo en que los movimientos propios de las estrellas parecen converger en un punto del cielo, del mismo modo que los raíles paralelos del ferrocarril parecen converger en un punto en la distancia. Hay otras técnicas estadísticas que se utilizaron también para medir las distancias a las estrellas, pero éste no es lugar para entrar en tantos detalles. <<

[3] Este efecto aprieta las ondas de la luz procedente de objetos que se mueven hacia nosotros, desplazando las características registradas en el espectro hacia el extremo azul del mismo, y alarga las ondas de la luz procedente de objetos que se alejan de nosotros, produciendo un desplazamiento hacia el rojo, de tal forma que en ambos casos la medida del desplazamiento indica la velocidad relativa del objeto. <<

[4] Para entonces, Hertzsprung también había publicado sus resultados de una forma gráfica, en 1911, peor de nuevo en una revista que era bastante desconocida (para los astrónomos). <<

[5] Recalcamos lo de «intrínsecamente» brillantes o apagadas. No se trata del brillo aparente de una estrella en el firmamento, sino de lo brillante que es en realidad, vista muy de cerca, lo cual sabemos a partir de la distancia a la que se encuentra. <<

[6] Fue Russell en 1914, junto con su discípulo Harlow Shapley, de quien hablaremos más adelante, el primero que perfeccionó estas estimaciones de las distancias, teniendo en cuenta la extinción. <<

[7] Del mismo modo que no se puede distinguir las estrellas de la Vía Láctea a simple vista y no fueron «descubiertas» hasta que Galileo dirigió su telescopio hacia ellas. <<

[8] Fui uno de los miembros del equipo que finalmente dejó establecido que la Vía Láctea es tan sólo una galaxia ordinaria; mis colegas fueron Simon Goodwin, que actualmente trabaja en la Universidad de Cardiff, y Martin Hendry, que está ahora en la Universidad de Glasgow. <<

[9] El par de galaxias con corrimientos hacia el azul, una de las cuales es Andrómeda, se encuentran muy próximas a nosotros a escala cósmica y se mueven hacia nosotros por influencia de la gravedad; esto contrarresta la expansión universal a estas escalas relativamente locales. <<

[10] La teoría de Einstein predice el tamaño exacto de esos hoyuelos y, por consiguiente, hasta qué punto la luz se desvía cuando sigue una línea de mínima resistencia al pasar cerca de un objeto como el Sol, razón por la cual fue tan importante la expedición de Eddington para hacer observaciones durante los eclipses en 1919. <<

[11] Se puede ver esto gráficamente dibujando una línea ondulante en una gruesa banda elástica y estirando luego esta banda. <<

[12] Un término que en realidad acuñó el astrónomo Fred Hoyle en la década de 1940, para burlarse de un modelo que le pa-

recía abominable. <<

[13] Los datos más recientes sugieren que el universo puede haber empezado ahora a expandirse con mayor rapidez, presumiblemente porque, después de todo, existe una constante cosmológica. Esto no afecta significativamente a estos cálculos de la edad del universo y, además, la discusión relativa a estos trabajos que todavía se están realizando queda fuera del alcance de este libro. <<

[14] En realidad se trata de un descubrimiento de gran calado. La edad del universo se calcula esencialmente a partir de la teoría general de la relatividad y responde a las leyes de la física a muy gran escala; las edades de las estrellas, como veremos más adelante, se calculan esencialmente a partir de las leyes de la mecánica cuántica y utilizando la física de las escalas muy pequeñas. Sin embargo, la edad del universo resulta ser mayor que las edades de las estrellas más viejas, lo suficientemente mayor como para que hubiera el tiempo necesario para que se formaran las primeras estrellas después del *Big Bang*. Esta concordancia entre la física de las grandes y de las pequeñas escalas es un indicio importante de que toda la ciencia está construida sobre cimientos sólidos. <<

[15] Por ejemplo, en su libro *The Creation of the Universe*. <<

[16] Siempre he sospechado que los miembros del comité del Premio Nobel, como muchas otras personas, pensaron que el autor de esta predicción había sido Gamow, que murió en 1978, y los premios Nobel nunca se conceden a título póstumo. No hay ninguna otra razón obvia por la cual Alpher y Herman pudieran haber sido ignorados. <<

[17] Muchas de estas interacciones se producen también con emisión de neutrinos, pero, para simplificar las cosas, no entraremos en estos detalles. <<

[18] La emisión de un positrón hace que uno de los protones del núcleo se convierta en un neutrón. <<

[19] Es interesante observar que este descubrimiento se hizo medio siglo después de que Rutherford hubiera identificado la radiación alfa como una radiación de núcleos de helio. <<

[20] Con el nombre de los autores en orden alfabético (Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle), los astrónomos suelen referirse a este informe como «B2FH». <<

ÍNDICE